

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra částí a mechanismů strojů

Víceúčelový kamerový jeřáb
Multipurpose Camera Crane

Student:

Bc. Jiří PETR

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Zdeněk Foltá, Ph.D.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra částí a mechanismů strojů

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Petr**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace: 40 Konstrukce strojních dílů a skupin
Téma: **Víceúčelový kamerový jeřáb**
Multipurpose Camera Crane
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Navrhněte koncept víceúčelového jeřábu pro umístění a pohyb kamery.

Kamerový jeřáb je určen pro pořízení statických i dynamických záběrů v terénu při obsluze jednou osobou.

Zpracujte konstrukční návrh jeřábu. Konstrukce má umožňovat snadné složení a manipulaci s důrazem na nízkou hmotnost a vysokou tuhost.

Proveďte nezbytné pevnostní výpočty nosných částí konstrukce.

Zpracujte výkresovou dokumentaci v rozsahu výkresu sestavení min. formátu A1 a tří dílenských výkresů dle pokynů vedoucího práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

DEJL, Z.: *Konstrukce strojů a zařízení I – Spojovací části strojů*. Montanex a.s. Ostrava, 2000.

BOHÁČEK, F.: *Části a mechanismy strojů I - Spoje*. VUT Brno, 1987.

BOLEK, A. A KOL.: *Části strojů - svazek 1*. SNTL Praha, 1990.

NĚMČEK, M.: *Řešené příklady z částí a mechanismů strojů*. 2. vydání. Skripta VŠB-TU Ostrava, 2008, ISBN 978-80-248-1782-8.

KŘÍŽ, R.: *Strojnické tabulky II - Pohony*. Montanex a.s., Ostrava, 2002.

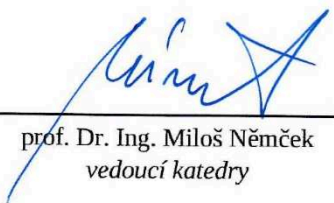
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milena Hrudičková, Ph.D.**

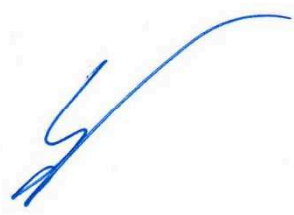
Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016





prof. Dr. Ing. Miloš Němček
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :

.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Jiří PETR

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Vřesinská 649, Klimkovice 742 83

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

PETR, J. *Víceúčelový kamerový jeřáb: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra částí a mechanismů strojů, 2016, 48 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Zdeněk Folta, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem víceúčelového kamerového jeřábu. V úvodní části je blíže vysvětlen jeho obecný účel. Dále je zpracována rešerše v této oblasti. Z těchto informací je pak zkonstruován vlastní návrh kamerového jeřábu. Bylo dbáno na jeho multifunkčnost, pevnost, skladnost a lehkost. Dále také byly vypracovány potřebné pevnostní výpočty, počítačové analýzy pomocí metody konečných prvků (MKP), výpočet vlastních frekvencí a výrobní výkresy vybraných částí konstrukce. Na závěr je provedeno zhodnocení dosažených cílů a celé práce.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

PETR, J. *Multipurpose Camera Crane: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machine Parts and Mechanisms, 2016, 48 p. Head of the thesis: doc. Ing. Zdeněk Folta, Ph.D.

This master thesis deals with the construction design of multipurpose camera crane. In the introductory part is further explained its general purpose. Then it is followed by formed research in this area. From these information is then constructed one own design of camera crane. Attention was concentrated to its multifunctionality, strength, compactness and lightness. Also have been created the necessary strength calculations, computer analyses using finite element method (FEM), calculation of the natural frequencies and manufacturing drawings of selected parts of the structure. At the end is an assessment of achieved goals and the whole work.

Obsah

1	Úvod	9
1.1	Cíle diplomové práce	9
2	Rešerše.....	10
2.1	Definice kamerového jeřábu.....	10
2.2	Rozdělení.....	10
3	Konstrukce jeřábu	14
3.1	Volba materiálů	16
3.2	Motorizovaná hlava	17
3.3	Vrchol jeřábu.....	20
3.4	Rameno jeřábu	21
3.5	Střed jeřábu	23
3.6	Pata jeřábu.....	27
3.7	Stativ a protizávaží	27
4	Analýza MKP.....	31
4.1	Vrchol jeřábu	31
4.2	Střed jeřábu	32
4.3	Pata jeřábu.....	35
4.4	Napětí v zámku ramene (kritické místo)	38
5	Vlastní frekvence.....	40
6	Závěr.....	44
7	Seznam použité literatury	45
8	Seznam příloh	47

Seznam použitých značek a symbolů

Označení	Popis veličiny	Jednotka
b_{s1}, b_{s2}	Šířka stykové plochy	mm
d_1, d_2, d_L	Vnitřní průměr	mm
d_{3M6}, d_{3M8}	Vnitřní průměr šroubu	mm
d_{ξ}	Průměr čepu	mm
d_K	Průměr kuličky	mm
d_l	Průměr otvoru ložiska	mm
d_{s1}, d_{s2}	Průměr stykové plochy	mm
h_s	Výška stativu s hlavou	mm
i_K	Počet kuliček	-
k_{s1}, k_{s2}	Součinitel bezpečnosti	-
l_1, l_2	Délka	mm
l_{ξ}	Délka čepu	mm
l_K	Vzdálenost klopného bodu	mm
l_l	Délka ložiska	mm
m_{hk}	Hmotnost hlavy jeřábu s kamerou	kg
p_l	Tlak působící na ložisko	MPa
v	Obvodová rychlost	$m \cdot s^{-1}$
y_{max}	Maximální průhyb	mm
A_{10}	Tažnost	%
D_1, D_2, D_L	Vnější průměr	mm
E	Modul pružnosti	GPa
F_1, F_2, F_3, F_4, F_L	Zatěžující síla	N
F_G	Síla vyvolaná hmotností celé sestavy	N
F_P	Síla překlopení	N
HB	Tvrdost	-
J_A	Axiální integrál	-
Q_{max}	Maximální zatížení ložiska	N
R	Největší délka ramene	mm

Označení	Popis veličiny	Jednotka
R_e, R_{e1}, R_{e2}	Mez pevnosti v kluzu	MPa
R_m	Mez pevnosti v tahu	MPa
ω	Úhlová rychlost	$rad \cdot s^{-1}$
$\sigma_{o1}, \sigma_{o2}, \sigma_{o3}$	Napětí v ohybu	MPa
σ_{t1}, σ_{t2}	Napětí v tahu	MPa
τ_{l1}, τ_{l2}	Smykové napětí	MPa

1 Úvod

Kamerový jeřáb patří mezi jedno z nejpoužívanějších příslušenství pro natáčení videí (filmů). Existuje spousta variant konstrukcí tohoto zařízení. Od velkých komerčních jeřábů s třicetimetrovým ramenem pro filmové kamery až po menší soukromé dvoumetrové jeřáby pro malé kamery. Běžně však nejsou dostupné lehké jeřáby se středně velkým ramenem pro natáčení v přírodě. Rozhodl jsem se tedy provést vlastní konstrukční návrh takového kamerového jeřábu.

Diplomová práce je zaměřena na návrh kamerového jeřábu především pro soukromé natáčení malou kamerou do 1 kg v terénu při obsluze jednou osobou. Z tohoto důvodu musí být dostatečně pevný a relativně lehký pro jeho snadné přenášení a ovládání. Bude také opatřen motorizovanou hlavou, která bude splňovat i další doplňkovou funkci. Rameno jeřábu musí být dlouhé minimálně 4 metry.

Konečný vlastní návrh jeřábu bude zkontrolován pomocí pevnostních výpočtů a počítačové simulace metodou konečných prvků (MKP).

1.1 Cíle diplomové práce

- Vypracování rešerše ve sféře kamerových jeřábů.
- Návrh vlastní konstrukce kamerového jeřábu včetně motorizované hlavy.
- Vytvoření 3D modelu konstrukce v počítači.
- Kontrola pevnostními výpočty a počítačovou analýzou MKP nosných částí konstrukce.
- Zjištění vlastních frekvencí konstrukce jeřábu.
- Zhotovení výkresu sestavení.
- Vypracování tří dílenských výkresů vybraných částí konstrukce.

2 Rešerše

Tato kapitola je zaměřena na rozdělení dostupných kamerových jeřábů podle jejich velikostí a možnosti ovládání. Podrobně podá informace o těchto jednotlivých rozděleních.

2.1 Definice kamerového jeřábu

Toto zařízení slouží k pořízení jak dynamických, tak i občas statických kamerových záběrů. Skládá se z dlouhého ramene, které je uchyceno mimo své těžiště pomocí kloubu na podstavě (stativu). Na konci jeho delší části je uchycena kamera a na opačném konci kratší části je umístěno protizávaží tak, aby celé rameno bylo vyvážené. To zajišťuje jednoduchý a kontrolovaný pohyb kamery a vzniká tzv. jeřábový efekt na výsledných kamerových záběrech. To je efekt, kdy záběr plynule přechází z malé výšky do větší, nebo naopak. Velikost tohoto efektu závisí na délce ramene. Čím delší rameno, tím jeřábový efekt bude větší a znatelnější na konečných záběrech. Příklad kamerového jeřábu je zobrazen na obrázku 1.



Obr. 1 Příklad kamerového jeřábu [12]

2.2 Rozdělení

podle velikosti

- malé
- střední
- velké

podle možnosti ovládání

- ruční ovládání
- ruční ovládání s dálkově řízenou hlavou
- celkové dálkové ovládání

Malé kamerové jeřáby

Tyto jeřáby jsou určené pro malé a střední kamery. Velikost ramene se pohybuje v rozmezí od jednoho až tří metrů. Jsou většinou stavěny pouze pro ruční ovládání. Mají jednoduchou konstrukci, jsou snadno ovladatelné a dají se složit. Díky menšímu rameni, však nedosahují velkého rozpětí a tudíž u nich dostatečně nevynikne velký jeřábový efekt.



Obr. 2 Příklad malého kamerového jeřábu [13]

Střední kamerové jeřáby

Tyto typy jeřábů tvoří takovou střední třídu mezi velkými filmovými jeřáby a malými soukromými jeřáby. Jsou určeny jak pro menší kamery, tak i pro větší filmové kamery. Jejich konstrukce je již složitější a využívá například ocelová lanka pro zpevnění a vyztužení ramene jeřábu. To má pak pozitivní vliv na konečný vzhled kamerových záběrů (stabilnější), ale naopak se to negativně projeví na hmotnosti a tedy i skladnosti jeřábu. Délka ramene je většinou do osmi metrů. Ovládání těchto jeřábů je většinou ruční a občas doplněné dálkově řízenou hlavou.



Obr. 3 Příklad středně velkého kamerového jeřábu [14]

Velké kamerové jeřáby

Do této skupiny se už řadí jeřáby s velkým ramenem, které může dosahovat až třiceti metrů délky. Jsou to tedy jeřáby primárně určené pro natáčení filmů. Jejich konstrukce je již značně složitější. Často se takovéto jeřáby dovážejí na natáčení ve velkých kamiónech. Kontrola pohybu kamery a ramene jeřábu je již plně dálkově řízena. Také existují jeřáby s výsuvným ramenem, u kterého je však nutné, aby se také posouvalo protizávaží, z důvodu dodržení vyváženosti.



Obr. 4 Příklad třicetimetrového kamerového jeřábu s výsuvným ramenem [15]

Ručně ovládané jeřáby

Operátor takového jeřábu ovládá všechny funkce sám. Tedy řídí zdvih a otáčení ramene a také natáčí kameru. Ta se nastavuje buď před natáčením, anebo také v jeho průběhu pomocí táhla. To můžete vidět na obrázku 5.



Obr. 5 Ručně ovládaný kamerový jeřáb s naklápěcí hlavou [16]

Ručně ovládaný jeřáb s dálkově řízenou hlavou

U těchto jeřábů operátor stále ovládá ručně zdvih a otáčení ramene, ale hlava s kamerou už je motorizovaná a tedy dálkově řízená (většinou dalším osobou). Je možné ji ovládat různými způsoby. Např. pomocí kabelu s ovladačem (joystickem), nebo RC ovladačem, nebo také automaticky, kdy kamera sleduje nastavený bod v záběru.



Obr. 6 Dálkově ovládaná hlava jeřábu [17]

Plně dálkově řízené jeřáby

Zde se řadí převážně jeřáby uchycené na automobilu. Operátor tak může sedět uvnitř vozidla a jednoduše ovládat celý jeřáb zevnitř. Tyto jeřáby jsou však konstrukčně složité. Také je velmi obtížné udržet kameru stabilní při nerovném terénu.



Obr. 7 Plně dálkově řízený kamerový jeřáb umístěný na automobilu [18]

3 Konstrukce jeřábu

Než jsem přikročil k vlastní konstrukci mého kamerového jeřábu, uvažoval jsem nad jeho provedením. Nejvíce jsem se zaměřil na konstrukci ramene jeřábu, jelikož je to nejdůležitější část celé sestavy. Na jeho tuhosti závisí kvalita výsledných záběrů a rovněž bezpečnost operátora jeřábu. Nedostatečně pevné rameno se může rozkmitat a tím způsobit nekvalitní kamerové záběry, zranění operátora jeřábu, nebo také pád protizávaží z jeho uchycení.

Při prvním zkoumání dostupných kamerových jeřábů na trhu jsem si všiml, že nejčastěji se používají jednotyčová a dvoutyčová ramena. Jen zřídka můžeme vidět třítyčové ramena kamerového jeřábu. Níže v tabulce 1 jsem postavil jednotlivé varianty vedle sebe a porovnal jejich výhody a nevýhody.

Tab. 1 Porovnání typů ramene jeřábu

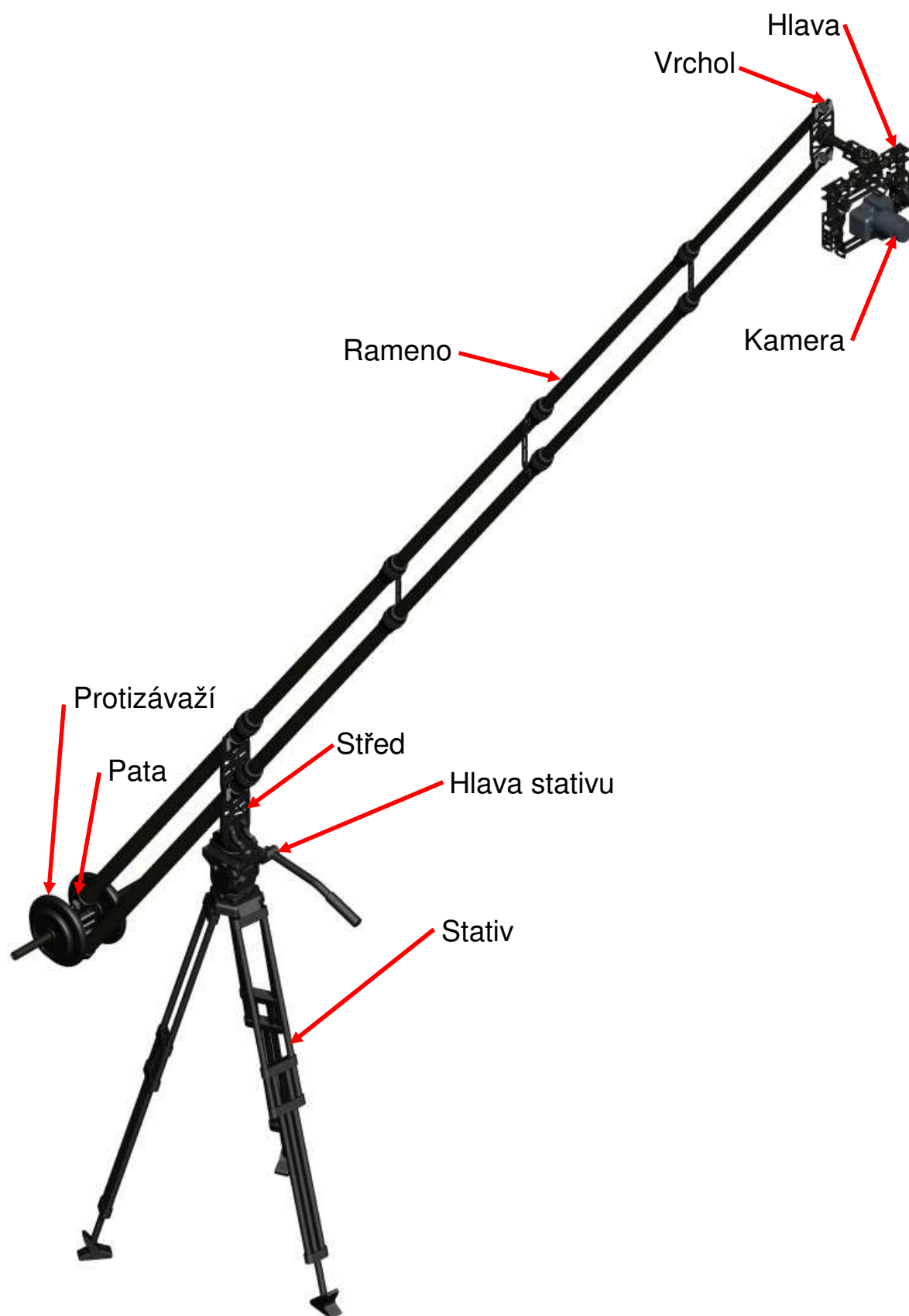
	Typ ramene jeřábu		
	Jednotyčové	Dvoutyčové	Třítyčové
Hmotnost	Nízká	Střední	Vysoká
Skladnost	Vysoká	Střední	Nízká
Složitost konstrukce	Nízká / Střední	Nízká / Střední	Vysoká
Délka ramene	Nízká / Střední	Nízká / Střední	Vysoká
Tuhost	Nízká	Střední	Vysoká

Nejprve jsem se rozhodl navrhnout třítyčové rameno jeřábu, a to i přesto, že má více nevýhod než výhod. Myslel jsem, že při mé středně velké konstrukci jeřábu nebude tento návrh příliš těžký a naopak bude zajišťovat větší tuhost rameni. Při vytváření modelu v počítači se však ukázalo, že je tato varianta konstrukčně velmi složitá.

Proto jsem od této varianty odstoupil a zaměřil jsem se na dvoutyčovou konstrukci jeřábu. Ta je takovou střední cestou mezi třítyčovou a jednotyčovou variantou. Její konstrukce je méně složitá, má menší hmotnost a dá se jednoduše složit, přenášet a skladovat.

Vlastní konstrukce jeřábu

Celá vlastní konstrukce kamerového jeřábu byla vytvořena v počítačovém programu Autodesk Inventor. To mi umožnilo si nejen ověřit správné velikosti a sestavitelnost jednotlivých částí, ale také i skladnost a funkční rozsah (např. maximální možný náklon ramene) mého kamerového jeřábu. V neposlední řadě jsem mohl vybrané prvky zkontrolovat pomocí pevnostních výpočtů. Na obrázku 8 je uvedeno schéma mého kamerového jeřábu s popisem jednotlivých částí.



Obr. 8 Vlastní konstrukce jeřábu s popisem

3.1 Volba materiálů

Jako první krok při návrhu mého kamerového jeřábu jsem provedl volbu materiálů konstrukce. Jelikož jeřáb musí být dostatečně pevný a lehký, zvolil jsem dva materiály - slitinu hliníku a uhlíková vlákna. Tyto materiály se vyznačují svou dostatečnou pevností a nízkou hmotností, takže jsou velmi vhodné pro mou konstrukci. Ze slitiny hliníku budou vytvořeny nosné a spojovací prvky jeřábu (např. Vrchol, Střed a Pata jeřábu). Z uhlíkových vláken pak budou zhotoveny hlavní části konstrukce (Rameno a Hlava jeřábu). Pro jednoduchost a cenu výroby jsem zvolil standardně vyráběné kompozitní trubky a desky.

Slitina hliníku

Hliníkové slitiny patří v oblasti řešených typů konstrukcí mezi jedny z nejpoužívanějších. Jsou unikátní svou lehkostí, elektrickou vodivostí, relativní pevností a dobrou obrobitelností. Lze je také jednoduše povrchově upravit (eloxování) a tedy i ochránit před korozí nebo opotřebením.

Z nabízeného sortimentu jsem zvolil slitinu hliníku 42 4203 AlCu4Mg1 (tzv. Superdural). Jedná se o konstrukční materiál na letadla, vozidla a jiné dopravní prostředky. Také je vhodný pro různá zdvihadla, jeřáby a mostní konstrukce. Níže v tabulce 2 jsou uvedeny jeho mechanické vlastnosti. V závorkách jsou zvoleny hodnoty pro výpočet. [1, 2, 3]

Tab. 2 Mechanické vlastnosti slitiny hliníku [1, 2]

Hustota	ρ [kg/m^3]	2700
Mez kluzu	R_e [MPa]	200 až 290 (200)
Pevnost v tahu	R_m [MPa]	200 až 400 (250)
Minimální tažnost	A_{10} [%]	14 až 6
Minimální tvrdost	HB	55 až 110

Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna vynikají velmi vysokou pevností a tuhostí, až téměř desetinásobnou oproti skleněným vláknům. Naopak mají nízkou tažnost a jsou tak velmi křehké. Také jejich velkou výhodou je nízká hustota a tedy i nízká hmotnost. Oproti skelným vláknům mají dobrou odolnost proti únavě, ale špatně odolávají ohybům přes ostré hrany. Nevýhodou je také jejich vysoká cena. [3, 4, 5]

Existuje mnoho druhu uhlíkových vláken. Standardně jsou však rozdělena do čtyř různých kategorií - UHM (ultra high modulus - velmi vysoký modul), HM (high modulus - vysoký modul), UHS (ultra high strength - velmi vysoká pevnost) a HS (high strength - vysoká pevnost). Zvolil jsem provedení uhlíkových vláken HM. V následující tabulce 3 jsou uvedeny mechanické vlastnosti tohoto typu uhlíkových vláken. V závorkách jsou zvoleny hodnoty pro výpočet. [3, 4, 5]

Tab. 3 Mechanické vlastnosti uhlíkových vláken [3, 4, 5]

Hustota	ρ [kg/m^3]	1800 až 2000
Modul pružnosti	E [GPa]	100 až 400 (100)
Pevnost v tahu	R_m [GPa]	1 až 2 (1)
Minimální tažnost	A_{10} [%]	1,3 až 0,3

Porovnal jsem trubku z uhlíkových vláken o vnějším průměru 28 mm, tloušťkou stěny 1 mm a délkou 1000 mm s duralovou trubkou o stejných rozměrech. Trubka z uhlíkových vláken je zhruba až o 50 % lehčí a dvojnásobně pevnější než trubka z duralu. Ta je ale přibližně o 60 % levnější. Volím tedy stále konstrukci ramene z trubek z uhlíkových vláken, i přes vyšší cenu. [23, 24]

3.2 Motorizovaná hlava

Tato část jeřábu je velmi důležitá pro řízení pohybu kamery. Jelikož mým úkolem bylo navrhnout multifunkční konstrukci jeřábu, rozhodl jsem se tomuto konstrukčnímu uzlu přidat další funkci, a tou je tzv. gimbal. Toto zařízení slouží k automatické stabilizaci kamery upevněné v jeho středu. O samotnou stabilizaci se starají tři motorky, které jsou umístěny v jednotlivých osách x, y, a z. Ty dostávají informace ze senzoru polohy umístěného pod kamerou a drží jí tak neustále ve stabilizované poloze. Příklad konstrukce gimbálu je uveden na obrázku 9.



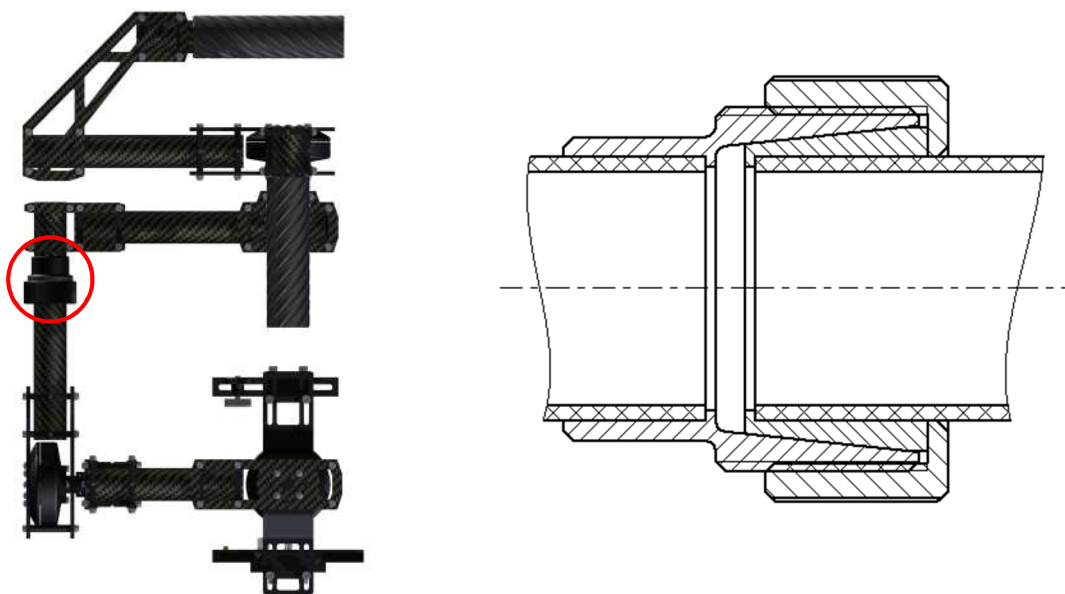
Obr. 9 Gimbal s připevněnou kamerou [19]

Na obrázku 10 je pak zobrazena vlastní konstrukce gimbálu. Pro pohon kamery v jednotlivých osách jsem zvolil speciální motorky iPower GBM6208H-150T určené přímo pro tento typ zařízení. Jsou bez-uhlíková a zajišťují tak hladký nepřerušovaný pohyb. Celá ovládací jednotka včetně napájecích baterií je upevněna na zadní trubce.



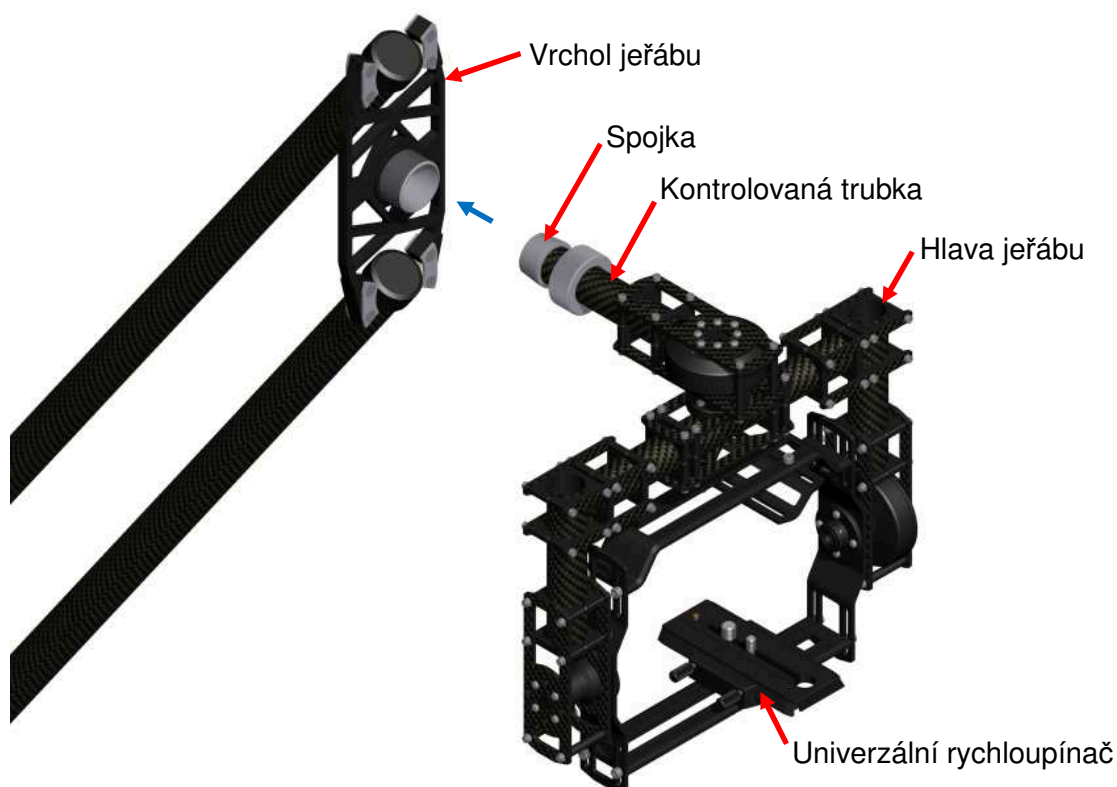
Obr. 10 Vlastní konstrukce gimbálu

Konstrukce mého gimbálu je také opatřena jednoduchou spojkou, která slouží k jeho rozdělení. Její umístění a průřez je zobrazen na obrázku 11. Je založená na principu kuželového spoje s převlečnou maticí. Tím je možno nastavit vzájemnou polohu (natočení) dvou spojovaných trubek.



Obr. 11 Spojka a její umístění v konstrukci gimbalu

Po rozpojení této spojky se stane ze spodní části gimbalu motorizovaná hlava mého kamerového jeřábu. Ta se opět pomocí stejné spojky upevní na jeho vrchol. To je názorně zobrazeno na obrázku 12. Vlastní konstrukce hlavy je také nastavitelná a opatřena univerzálním rychloupínačem, tudíž lze do ní umístit jakoukoliv kameru s hmotností do 1 kg.



Obr. 12 Připojení motorizované hlavy k vrcholu jeřábu s popisem

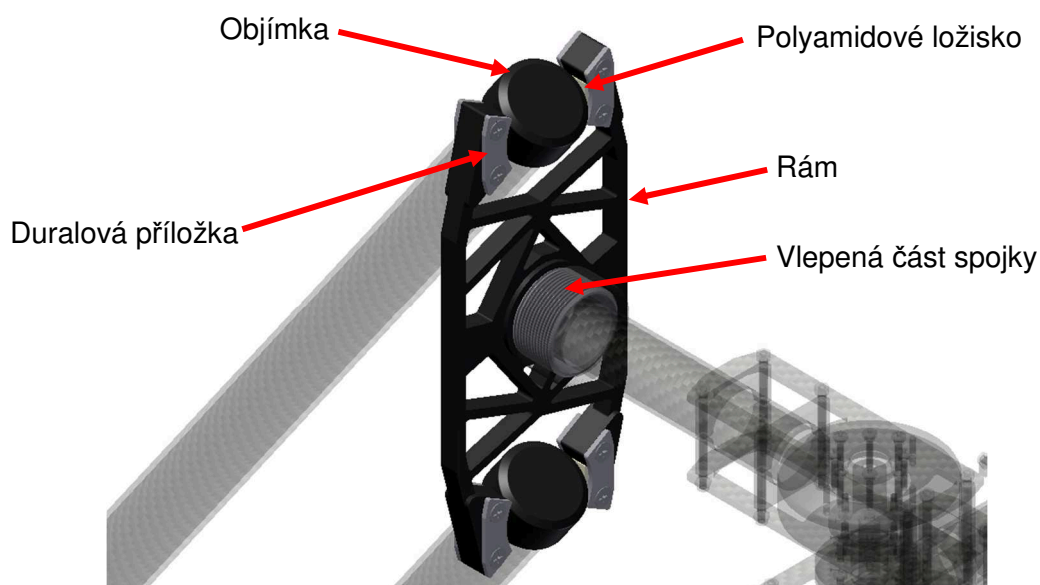
Uhlíkovou trubku spojující vrchol jeřábu s motorizovanou hlavou jsem zkontroloval na ohyb. Její umístění je zobrazeno na obrázku 12. Vnější průměr trubky je $D_1 = 26 \text{ mm}$ a vnitřní průměr $d_1 = 23 \text{ mm}$. Délka této trubky je $l_1 = 200 \text{ mm}$. Zatěžující síla byla stanovena z hmotnosti motorizované hlavy a maximální možné hmotnosti kamery pro vlastní návrh jeřábu. Vzhledem k tomu, že konstrukce může být také namáhána dynamicky (povětrnostní podmínky, rychlé změny směru pohybu ramene atd.), uvažoval jsem u pevnostních výpočtů s dynamickým součinitelem 5. Zvětšil jsem tak zatěžující sílu pětinasobně. Její výpočtová velikost je tedy $F_1 = 175 \text{ N}$. Při těchto zátěžných podmínkách vychází napětí v ohybu:

$$\sigma_{o1} = \frac{F_1 \cdot l_1}{\frac{\pi}{32} \cdot \frac{(D_1^4 - d_1^4)}{D_1}} = \frac{175 \cdot 200}{\frac{\pi}{32} \cdot \frac{(26^4 - 23^4)}{26}} = 52,33 \text{ MPa} \quad (1)$$

Uhlíková vlákna mají mez pevnosti v tahu 1000 MPa. To znamená, že trubka vychází s vysokou bezpečností 19,1 a pevnostně vyhovuje i při působení dynamických sil. [1, 6, 7]

3.3 Vrchol jeřábu

Tento konstrukční uzel s popisem je zobrazen na obrázku 13. Jeho základ tvoří rám vyrobený z desky ze slitiny hliníku. Předpokládám nejprve obrábění pomocí vodního paprsku a poté následným frézováním za účelem snížení hmotnosti. Je také povrchově upraven eloxováním. Do tohoto rámu jsou vloženy z obou stran duralové objímky s polyamidovými ložisky, které jsou upevněny šrouby přes duralové příložky. Do objímek jsou pak akrylátovým lepidlem vlepeny trubky ramene jeřábu. Část spojky, která slouží k připojení motorizované hlavy, je také vlepena do rámu pomocí akrylátového lepidla.



Obr. 13 Vrchol jeřábu s popisem

Lepený spoj mezi spojkou a rámem jsem zkontroloval na smyk. Zatěžující síla je v tomto případě stejná jako v předchozí části, tedy $F_1 = 175 \text{ N}$. Styková plocha spojky a rámu je na průměru $d_{s1} = 30 \text{ mm}$ s má šířku $b_{s1} = 12 \text{ mm}$. Velikost výsledného napětí v lepeném spoji je pak:

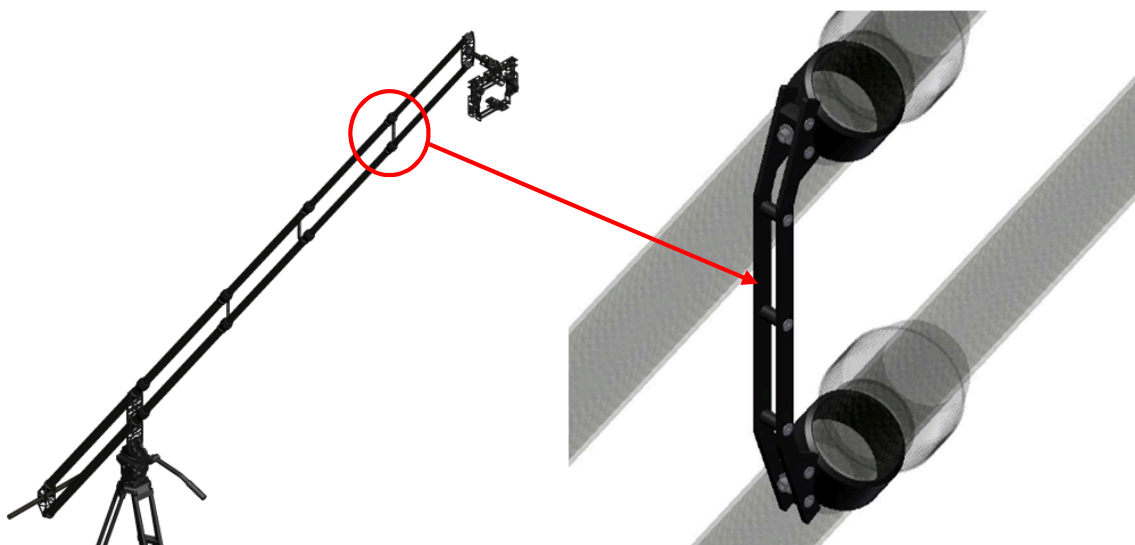
$$\tau_{l1} = \frac{F_1}{b_{s1} \cdot \pi \cdot d_{s1}} = \frac{175}{12 \cdot \pi \cdot 30} = 0,15 \text{ MPa} \quad (2)$$

Zvolil jsem akrylátové lepidlo LOCTITE AA 3504 s pevností ve smyku 22 MPa. Lepený spoj tedy pevnostně vyhovuje s velmi vysokou bezpečností. [1, 6, 7]

Vlastní rám byl zkontrolován počítačovou analýzou Metodou konečných prvků (MKP). Výsledky naleznete v kapitole 4 (Analýza MKP).

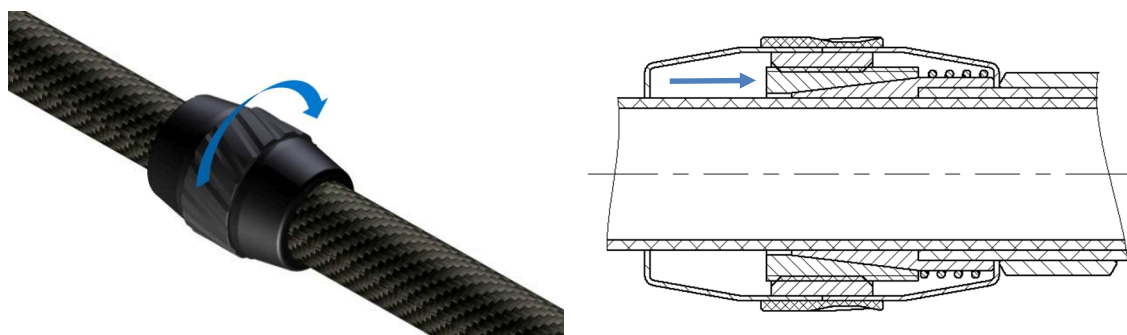
3.4 Rameno jeřábu

Toto je konstrukčně nejsložitější část celého kamerového jeřábu. Na rameno jsou kladeny vzájemně protichůdné požadavky. Musí mít co nejnížší hmotnost, ale zároveň také musí být dostatečně tuhé. Navrhl jsem tedy rameno ze dvou teleskopických tyčí z uhlíkových vláken. Můj návrh je zobrazen na obrázku 14. Toto dvojité rameno zajišťuje dostatečnou tuhost při pohybu s kamerou. Také slouží k zachování vertikální polohy vrcholu jeřábu. Po celém rameni jsou umístěny na koncích jednotlivých trubek lehké spojky, které tak zpevní celé rameno a dodají mu větší tuhost. Detail této spojky je vyobrazen na obrázku 14. Hliníkové objímky na těchto spojkách jsou pomocí akrylátového lepidla přilepeny na jednotlivé trubky.



Obr. 14 Rameno jeřábu a detail spojky teleskopických tyčí

Pro zajištění polohy jednotlivých trubek v teleskopickém rameni po vysunutí jsem navrhl jednoduché pojistné zámky. Detail a princip funkce zámku je zobrazen na obrázku 15. Je založen na kuželovém spoji. Jednotlivé tyče je možné zajistit v jakékoliv poloze a tím i nastavit potřebnou délku ramene.



Obr. 15 Detail a řez pojistného zámku tyčí ramene

Pomocí pevnostních výpočtů jsem zkontroloval nejmenší průřez teleskopické tyče ramene na ohyb. Jelikož kamerový jeřáb je díky protizávaží vyváženou konstrukcí, uvažuji nad jeho středem jako nad pevnou vazbou (vetknutý nosník). V tomto případě také aplikuju stejně velkou zatěžující sílu jako v kapitole 3.2 a 3.3, tedy $F_1 = 175 \text{ N}$. Vnější průměr trubky je $D_2 = 30 \text{ mm}$ a vnitřní průměr $d_2 = 26 \text{ mm}$. Maximální délka roztaženého ramene od středu jeřábu je $l_2 = 4050 \text{ mm}$. Uhlíková vlákna mají mez pevnosti v tahu 1000 MPa a modul pružnosti $E = 100 \text{ GPa}$. Maximální průhyb ramene je:

$$y_{\max} = \frac{F_1 \cdot l_2^3}{6 \cdot E \cdot \left[\frac{\pi}{64} \cdot (D_2^4 - d_2^4) \right]} = \frac{175 \cdot 4050^3}{6 \cdot 100000 \cdot \left[\frac{\pi}{64} \cdot (30^4 - 26^4) \right]} = 1118,1 \text{ mm} \quad (3)$$

Napětí v ohybu dvoutyčového ramene je:

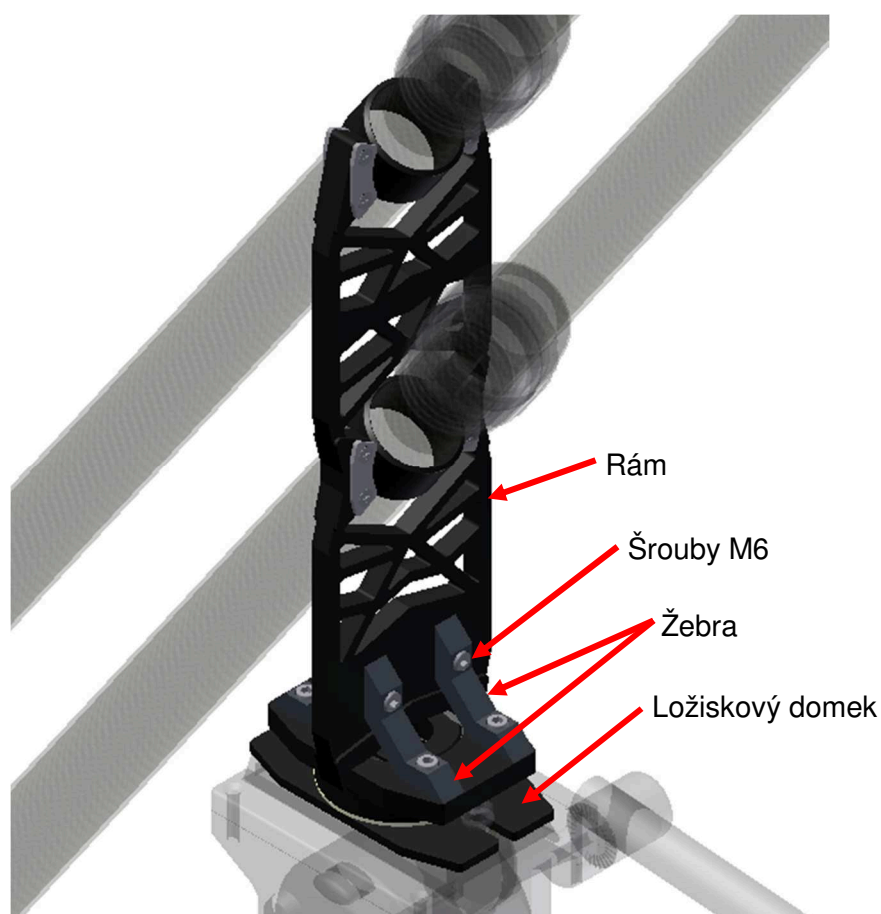
$$\sigma_{o2} = \frac{F_1 \cdot l_2}{2 \cdot \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(D_2^4 - d_2^4)}{D_2}} = \frac{175 \cdot 4050}{2 \cdot \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(30^4 - 26^4)}{30}} = 306,7 \text{ MPa} \quad (4)$$

Bezpečnost vůči mezi pevnosti je 3,3, což je hodnota dostatečná. Teleskopické rameno tak pevnostně vyhovuje i při působení dynamického účinku síly. [1, 6, 7]

V kapitole 4 (Analýza MKP) je zkontrolováno pomocí počítačové analýzy metodou MKP kritické místo v rameni jeřábu. Toto místo se nalézá v pojistném zámku, kde se trubka z uhlíkových vláken dotýká utahovací objímky ze slitiny hliníku. Zde tedy může dojít k praskání trubky při ohybu přes ostrou hranu.

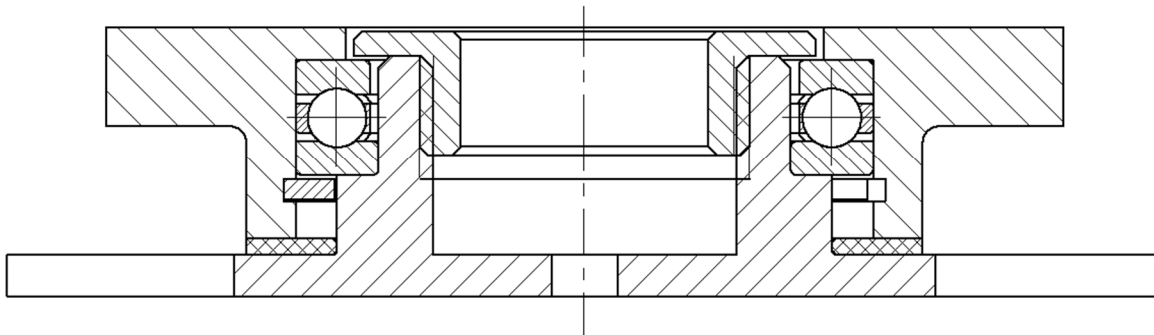
3.5 Střed jeřábu

Tato část konstrukce zajišťuje natáčení a naklápění celého jeřábu. Také na ní leží celá jeho hmotnost (největší zatížení). Na obrázku 16 je zobrazena vlastní konstrukce středu jeřábu s popisem. Je navrhnutá stejně jako již popsany vrchol jeřábu. Liší se pouze ve spodní části, kde je pomocí čtyř žeber a šesti šroubů M6 s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem připevněn ložiskový domek. Ten je opatřen ze spodní strany dvěma úchytnými body, kterými je celý střed jeřábu přichycen k hlavě stativu. Toto spojení je více popsáno v kapitole 3.7 (Stativ a protizávaží).



Obr. 16 Střed jeřábu s popisem

Na obrázku 17 je detail provedení mého návrhu uložení axiálního kuličkového ložiska v ložiskovém domku.



Obr. 17 Uložení axiálního ložiska

Zvolil jsem axiální kuličkové ložisko 51110 firmy SKF. Zde jsou uvedeny jeho parametry:

- vnější průměr: $D_L = 70 \text{ mm}$,
- vnitřní průměr: $d_L = 52 \text{ mm}$,
- průměr kuličky: $d_K = 7,144 \text{ mm}$,
- počet kuliček: $i_K = 24$.

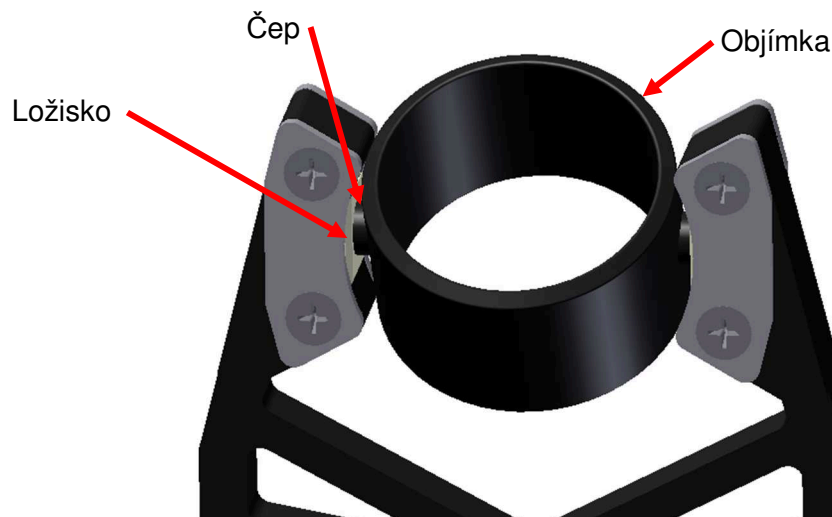
Provedl jsem výpočet jeho maximálního zatížení. Síla působící na ložisko byla odvozena z celkové hmotnosti jeřábu. I zde aplikuji dynamický součinitel 5. Velikost zatěžující síly je tak $F_L = 1250 \text{ N}$. Dle [7] jsem zvolil velikost axiálního integrálu $J_A = 0,1707$.

Maximální zatížení axiálního kuličkového je:

$$Q_{max} = \frac{F_L}{J_A \cdot \frac{D_L}{d_L}} = \frac{1250}{0,1707 \cdot \frac{70}{52}} = \underline{5439,8 \text{ N}} \quad (5)$$

Vzhledem k malému počtu otáčení jeřábu jsem provedl kontrolu pouze k statické únosnosti ložiska. Dle výrobce jeho statická únosnost je 75 kN. To znamená, že ložisko vyhovuje s velmi dostatečnou rezervou. [1, 6, 7]

Provedl jsem také výpočet pevnosti čepů objímek teleskopických tyčí a výpočet otlacení polyamidového ložiska těchto čepů. Detail tohoto konstrukčního uzlu je zobrazen na obrázku 18.



Obr. 18 Detail uložení objímky ramene s popisem

Stejně jako v přechozích částech i zde byla síla odvozená z celkové hmotnosti jeřábu. Jelikož se ve středu jeřábu nacházejí čtyři čepy, byla výpočtová síla rovnoměrně rozdělena na tyto čepy. Také jsem aplikoval dynamický součinitel 5. Velikost působící síly na jedno ložisko je tedy $F_2 = 300\text{ N}$. Průměr čepu je $d_\zeta = 9\text{ mm}$. Vzdálenost, ve které působí zatěžující síla na čepu, je $l_\zeta = 6,5\text{ mm}$. Napětí v ohybu čepu objímky je:

$$\sigma_{o3} = \frac{F_2 \cdot l_\zeta}{\frac{\pi \cdot d_\zeta^3}{32}} = \frac{300 \cdot 6,5}{\frac{\pi \cdot 9^3}{32}} = \underline{27,2\text{ MPa}} \quad (6)$$

Výše zvolená slitina hliníku 42 4203 má pevnost v tahu 250 MPa. Čep tedy pevnostně vyhovuje s bezpečností 9,2. [1, 6, 7]

Následně bylo tedy také zkontrolováno polyamidové ložisko na otláčení. Průměr otvoru v ložisku je $d_l = 9\text{ mm}$ a jeho délka je $l_l = 7\text{ mm}$. Zatěžující síla v tomto případě byla stejná jako v předchozím odstavci, tedy $F_2 = 300\text{ N}$. Výsledný tlak působící na ložisko je:

$$p_l = \frac{F_2}{d_l \cdot l_l} = \frac{300}{9 \cdot 7} = \underline{4,8\text{ MPa}} \quad (7)$$

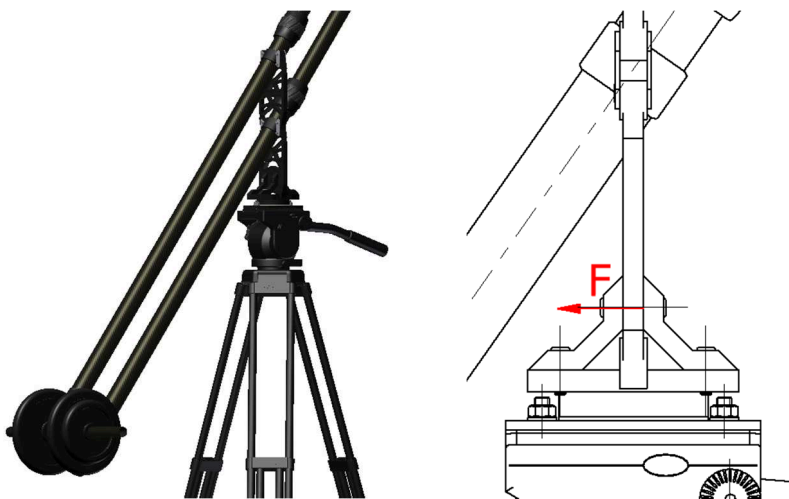
Pevnost v tlaku materiálu Polyamid PA 6.6 je 80 MPa. Ložisko tedy pevnostně vyhovuje s velmi vysokou bezpečností 16,7. [1, 6, 7]

Také jsem provedl pevnostní výpočet lepeného spoje mezi objímkou a tyčí teleskopického ramene. Je to nejvíce namáhaný lepený spoj celé sestavy. Styková plocha je na průměru $d_{s2} = 46\text{ mm}$ a její šířka je $b_{s2} = 32\text{ mm}$. Zatěžující síla spoje je $F_3 = 600\text{ N}$. Je už navýšena o dynamický součinitel 5. Výsledné smykové napětí v lepeném spoji je:

$$\tau_{l2} = \frac{F_3}{b_{s2} \cdot \pi \cdot d_{s2}} = \frac{600}{32 \cdot \pi \cdot 46} = \underline{0,13\text{ MPa}} \quad (8)$$

Zvolené akrylátové lepidlo LOCTITE AA 3504 má pevnost v tahu 22 MPa. Spoj pevnostně vyhovuje s velmi vysokou bezpečností 169,2. [1, 6, 7]

Zkontroloval jsem také pevnostními výpočty dva šrouby M6 upevňující rám středu jeřábu k žebřím. Při běžném používání kamerového jeřábu na tyto šrouby nepůsobí příliš velké zatížení. Avšak může nastat stav, kdy na rám středu působí ohybový moment. Konkrétně by k tomu mohlo dojít v případě, že operátor odstraní kameru z hlavy jeřábu na vysunutém rameni dříve než protizávaží, a tím dojde k okamžitému převážení ramene. To tedy způsobí velké zatížení na střed jeřábu. V opačném případě, pokud by operátor odstranil protizávaží dříve než kameru, vysunuté rameno se opře o zem, a na střed tak nepůsobí ohybový moment (správný postup). Kritický stav spolu s vyobrazením působící síly na šrouby je zobrazen na obrázku 19.



Obr. 19 Přetížení středu jeřábu a působení síly na šrouby

Šrouby M6 jsou tak namáhané tahem. Vnitřní průměr závitu je $d_{3M6} = 4,773 \text{ mm}$. Velikost zatěžující síly je stanovena z váhy protizávaží. V tomto případě již sílu nenavýšuji o dynamický součinitel, jelikož převážené rameno s protizávažím se nemůže dále pohnout (konečný stav). Výpočtová hodnota síly je tak $F_4 = 150 \text{ N}$. Velikost napětí v tahu ve šroubech je:

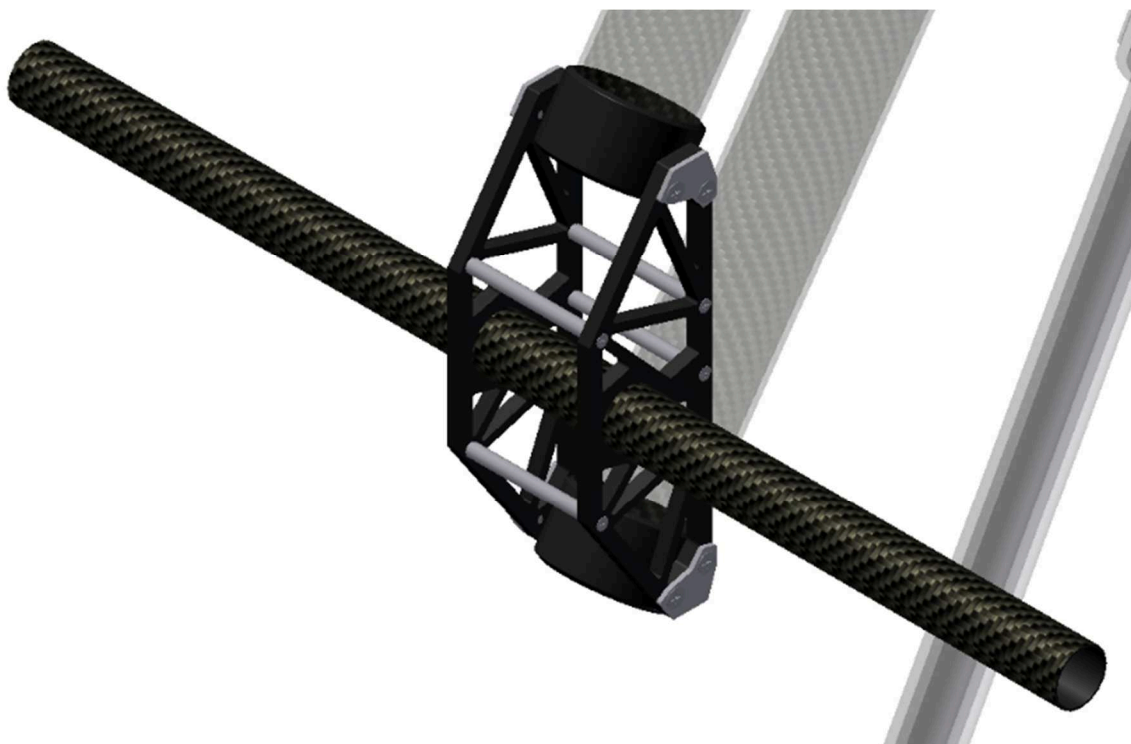
$$\sigma_{t1} = \frac{F_4}{2 \cdot \frac{\pi \cdot d_{3M6}^2}{4}} = \frac{150}{2 \cdot \frac{\pi \cdot 4,773^2}{4}} = 4,19 \text{ MPa} \quad (9)$$

Zvolené šrouby jsou vyrobeny ze slitiny hliníku s mezí kluzu $R_{e1} = 200 \text{ MPa}$. Spoj pevnostně vyhovuje s vysokou bezpečností 47,7. [1, 6, 7]

Vlastní rám středu jeřábu byl zkontrolován počítačovou analýzou metodou konečných prvků (MKP). Výsledky naleznete v kapitole 4 (Analýza MKP).

3.6 Pata jeřábu

Toto je konstrukční díl upevněný na dolním konci ramene. Slouží k připevnění protizávaží k vyvážení celého ramene kamerového jeřábu. Konstrukci jsem i zde volil podobnou jako u vrcholu a středu jeřábu. Základ tedy tvoří vyřezávaná deska ze slitiny hliníku. Aplikoval jsem ale dvě identické desky, které jsou umístěny podélně k rameni jeřábu. K sobě jsou připevněny pomocí menších trubek se závity a šrouby. To je názorně zobrazeno na obrázku 20. Protizávaží je poté nasazeno na uhlíkovou trubku, která je vložena do připravených otvorů v hliníkových deskách. Délku trubky jsem zvolil tak, aby se na ní jednak vešlo potřebné závaží, a také aby sloužila operátorovi k ovládání pohybu jeřábu. Objímky teleskopických tyčí jsou i zde vloženy do polyamidových ložisek, které jsou usazeny v deskách a pojištěny duralovými plíšky.



Obr. 20 Pata jeřábu

V tomto konstrukčním uzlu jsem se zaměřil více na počítačovou analýzu pomocí metody MKP. Výsledky této analýzy naleznete v kapitole 4 (Analýza MKP).

3.7 Stativ a protizávaží

Tyto dva poslední konstrukční uzly celé sestavy nebyly součástí řešení této diplomové práce. Připadá mi však nutné zmínit, o co se jedná a jaké dostupné typy těchto konstrukčních částí jsou vhodné pro můj návrh kamerového jeřábu.

Protizávaží existuje na trhu mnoho. Mají různé tvary, hmotnosti anebo jsou tvořeny z různých materiálů (litina, guma atd.). Z běžně dostupných typů jsem pro mou konstrukci zvolil závaží používané ve fitness centrech, tedy tzv. kotouče. Příklad takovýchto závaží je uveden na obrázku 21. Jsou ideální pro nasazení na trubku paty jeřábu, která byla i právě pro ně navržena. Tyto kotouče existují ve spoustě různých hmotnostech. To znamená, že můžeme lehce a přesně vyvážit rameno jeřábu. Alternativou kotoučů může být obyčejná taška vyrobená z odolné a pevné látky. Ta se jednoduše zavěsí na trubku paty jeřábu a do ní se může například nasypat písek, nebo vhodit těžké kameny. Toto řešení je vhodnější pro kameramany, kteří budou chtít natáčet v přírodě, a nechtějí tak sebou nosit těžké závaží.



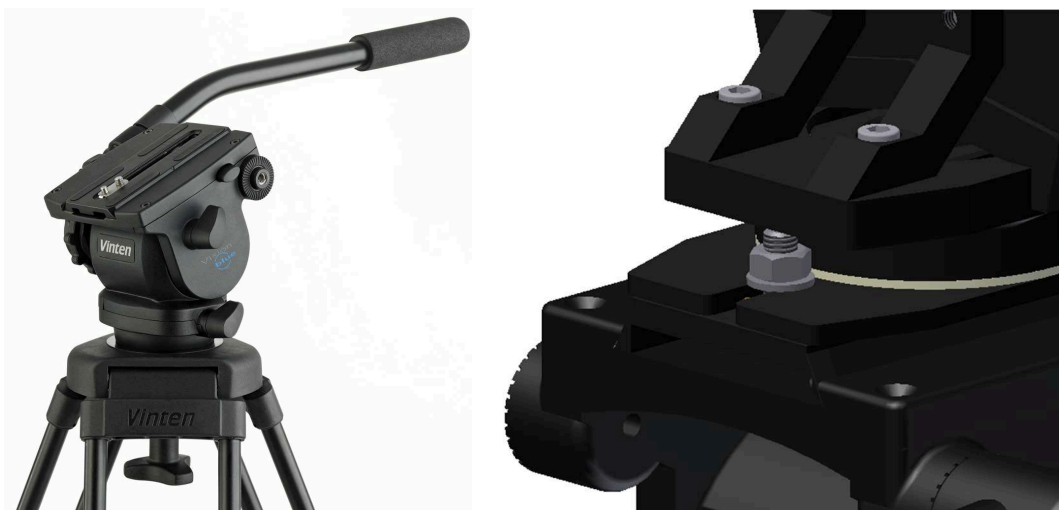
Obr. 21 Příklad vhodného protizávaží - kotouče [20]

Svou konstrukci jeřábu jsem navrhoval pro použití se stativem Vinten 3884-3 Two-stage Carbon Fibre EFP. Ten je zobrazen na obrázku 22. Jeho nosnost je 45 kg a váží 5,5 kg. Zvolil jsem jej proto, že rameno jeřábu může na stativ přenášet velké dynamické síly, a je tedy dobré mít pevný a stabilní základ celé konstrukce. Je možno použít i jiný typ stativu, avšak je nutné zvolit dostatečně pevný s vysokou nosností. Celá má konstrukce kamerového jeřábu (rameno, protizávaží, kamera) váží přibližně 25 kg. Doporučuji tedy zvolit stativ s nosností nad 30kg.



Obr. 22 Stativ firmy Vinten s nosností 45kg [21]

Rameno kamerového jeřábu je svým středním upevňovacím dílem připevněno na tento stativ k jeho hlavě, která normálně slouží k upevňování kamer. Pro zvolený stativ jsem vybral dle výrobce vhodnou hlavu Vision 10AS-AP2F. Střed ramene bude upevněn na rychloupínač, který slouží ke snadnému a rychlému odejmutí z hlavy. Konkrétně tento spoj mezi jeřábem a hlavou stativu je proveden dvěma šroubovými spoji M8. Zvolená hlava stativu a detail upevnění jeřábu jsou zobrazeny na obrázku 23.



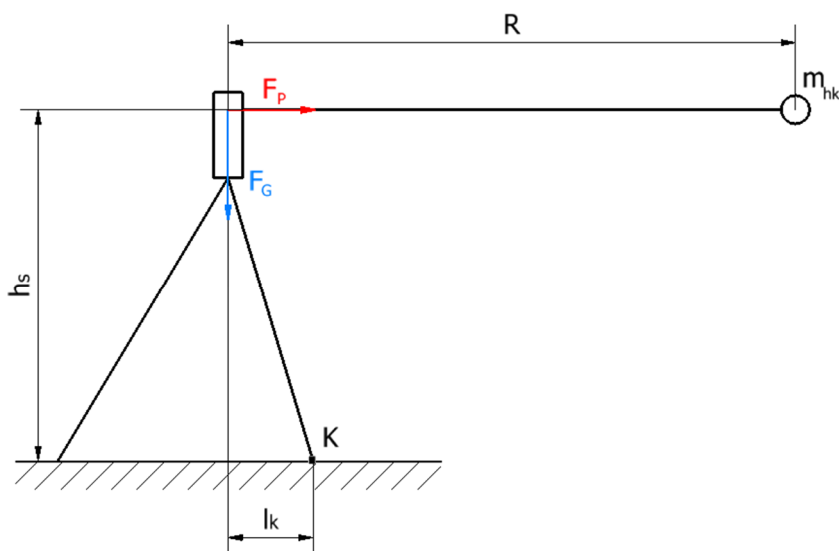
Obr. 23 Hlava stativu Vision 10AS-AP2F a detail upevnění jeřábu [22]

Tyto spojovací šrouby M8 jsou také namáhány tahem při kritickém zatížení středu jeřábu, který jsem již popsal výše v kapitole 3.5 (Střed jeřábu). Vnitřní průměr závitu je $d_{3M8} = 6,466 \text{ mm}$. Hodnota zatěžující síly je stejná jako v předchozím příkladu pro kritický stav (kapitola 3.5), tedy $F_4 = 150 \text{ N}$. Velikost napětí ve šroubech je:

$$\sigma_{t2} = \frac{F_4}{\frac{\pi \cdot d_{3M8}^2}{4}} = \frac{150}{\frac{\pi \cdot 6,466^2}{4}} = 4,56 \text{ MPa} \quad (10)$$

Materiál šroubů (ocel třídy 8.8) má mez kluzu $R_{e2} = 800 \text{ MPa}$. Spoj tak pevnostně vyhovuje s velmi vysokou bezpečností. [1, 6, 7]

Vypočítal jsem také maximální možné otáčení ramene, které by způsobilo převržení celé vlastní konstrukce jeřábu na zvoleném stativu. Na obrázku 24 je zobrazeno schéma pro tento výpočet.



Obr. 24 Schéma výpočtu převržení konstrukce jeřábu

Výška stativu s hlavou je $h_s = 1600 \text{ mm}$. Minimální vzdálenost klopného bodu stativu od středu podstavy je $l_K = 250 \text{ mm}$. Celá konstrukce jeřábu včetně stativu s hlavou vyvolává sílu $F_G = 400 \text{ N}$. Poté minimální síla pro překlopení konstrukce jeřábu kolem klopného bodu K se vypočítá:

$$F_G \cdot l_K = F_P \cdot h_s \rightarrow F_P = \frac{F_G \cdot l_K}{h_s} = \frac{400 \cdot 250}{1600} = \underline{62,5 \text{ N}} \quad (11)$$

Největší délka teleskopického ramene je $R = 4200 \text{ mm}$. Hmotnost hlavy jeřábu s kamerou je $m_{hk} = 3 \text{ kg}$. Z těchto hodnot a z velikosti minimální klopné síly jsem poté vypočítal úhlovou rychlost, při které dojde k převrnutí konstrukce:

$$\omega = \sqrt{\frac{F_P}{m \cdot R}} = \sqrt{\frac{62,5}{3 \cdot 4,2}} = \underline{2,2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}} \quad (12)$$

Pro lepší představu jsem vypočítal také obvodovou rychlost:

$$v = \omega \cdot R = 2,2 \cdot 4,2 = \underline{9,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} \quad (13)$$

Z výsledků tedy vyplývá, že nesmíme otáčet s ramenem větší rychlostí než $9,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pokud bychom tuto hodnotu překročili, došlo by k převržení celé konstrukce.

4 Analýza MKP

Vlastní konstrukce kamerového jeřábu obsahuje mnoho tvarově složitých dílů v jednotlivých částech celé sestavy. Z tohoto důvodu jsem provedl jejich kontrolu pomocí počítačové analýzy metodou konečných prvků. Všechny analýzy byly provedeny v počítačovém programu ANSYS 15.0.

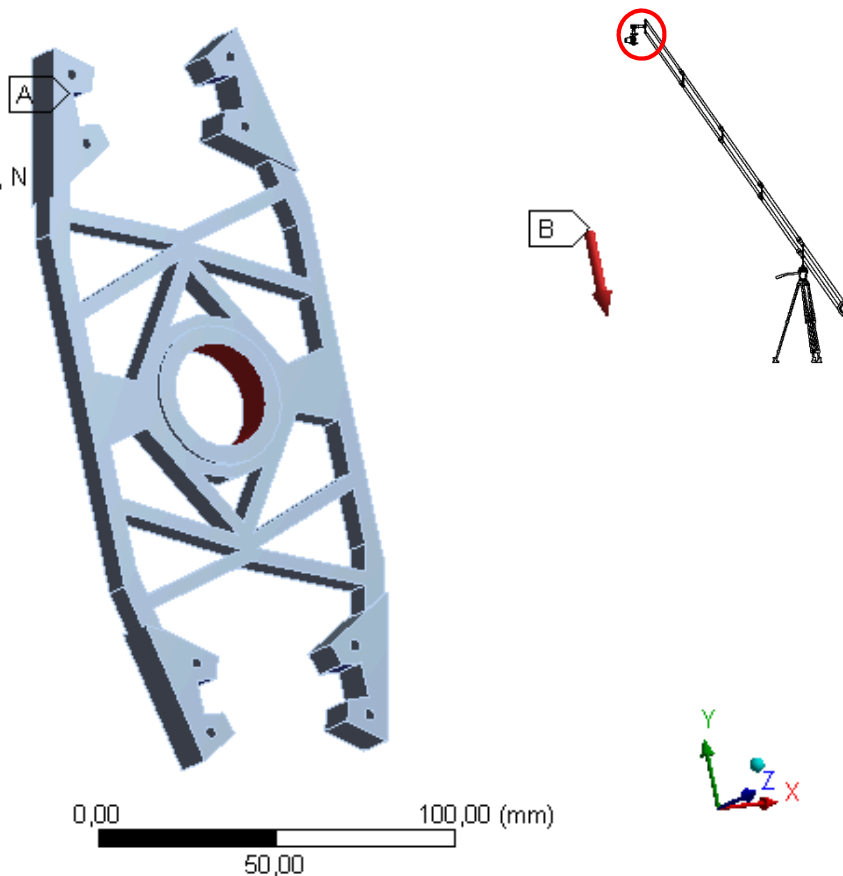
4.1 Vrchol jeřábu

Zde jsem pomocí MKP kontroloval pouze hliníkový rám. Ten jsem upravil a zjednodušil odstraněním zkosených a zaoblených hran. Tato úprava pomohla vytvořit jednoduchou síť a také přispěla k rychlejšímu výpočtu. Upravený model je zobrazen na obrázku 25. Lze na něm také vidět již aplikované okrajové podmínky. Pevnou vazbu jsem zadal na horní strany uložení ložisek. Síla je aplikována do otvoru pro spojku motorizované hlavy. Je posunutá do vzdálenosti, kde se nachází střed uchycení kamery. Vyvolává tak určitý ohybový moment. Velikost síly je odvozena z váhy kamery a hlavy jeřábu. Stejně jako u pevnostních výpočtů jsem aplikoval dynamický součinitel (pětinásobné zvětšení).

A: Static Structural

Okrajové podmínky
7.5.2016 22:55

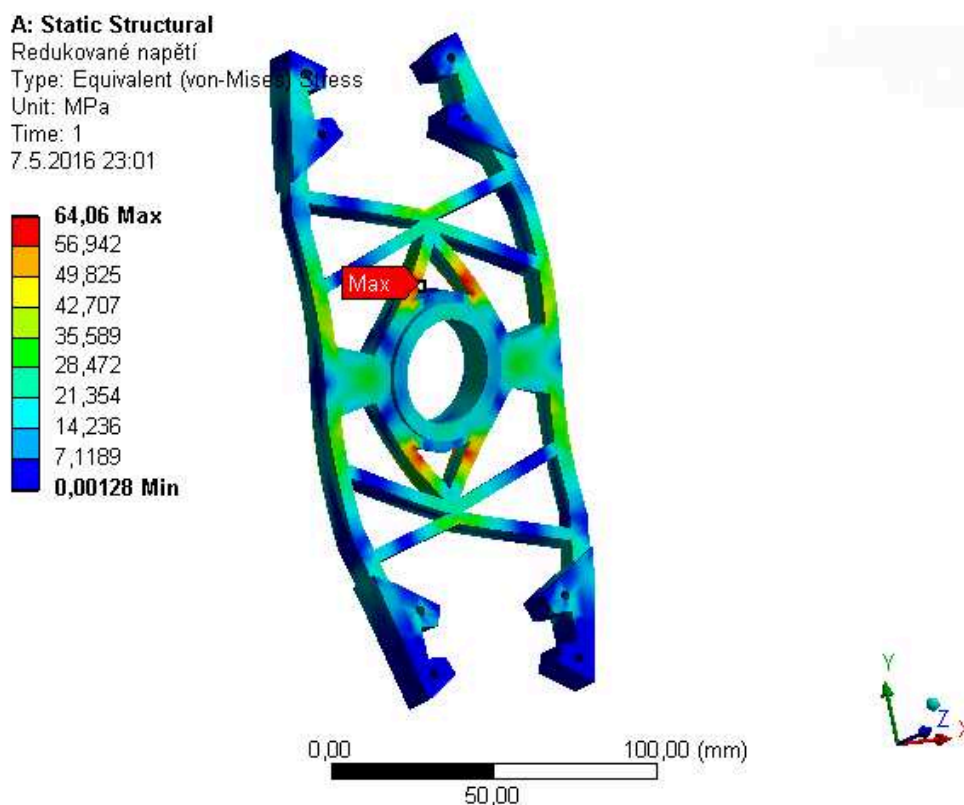
- A** Fixed Support
- B** Remote Force: 150, N



Obr. 25 Upravený model rámu vrcholu jeřábu (okrajové podmínky a umístění)

Výsledky:

Na obrázku 26 je výsledek analýzy redukovaného napětí rámu vrcholu kamerového jeřábu. Maximální napětí je 64,1 MPa. Mez pevnosti materiálu rámu vrcholu jeřábu je 250 MPa. Výsledná bezpečnost tohoto uzlu je 3,9. Rám tak pevnostně vyhovuje.



Obr. 26 Vrchol jeřábu - redukované napětí

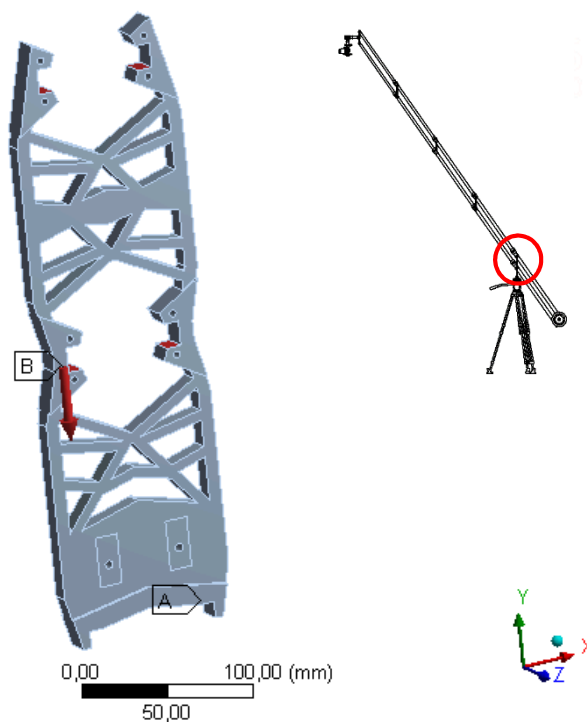
Hodnoty deformací tohoto i dále kontrolovaných dílů jsou z praktického hlediska nevýznamné, a proto jsem je do této práce neuváděl.

4.2 Střed jeřábu

Provedl jsem dvě analýzy rámu středu jeřábu. Nejprve jsem se zaměřil na analýzu tlakem. Tento případ nastává tehdy, když je jeřáb zcela vyvážený, a tak celou svou hmotností působí na rám. Na obrázku 27 je zobrazen upravený model s okrajovými podmínkami. Vzhledem k tomu, že síla působí směrem dolů (záporný směr osy y), aplikoval jsem pevnou vazbu jen v místě dotyku rámu s ložiskovým domkem. Působíště síly jsou umístěna na spodních stranách míst pro uložení polyamidových ložisek. Síla je odvozena z celkové váhy jeřábu. Opět je pětinasobně zvětšená (dynamický součinitel). Její velikost je tedy 1000 N.

A: stred_jerabu
Okrajové podmínky
7.5.2016 23:06

A Fixed Support
B Force: 1000, N



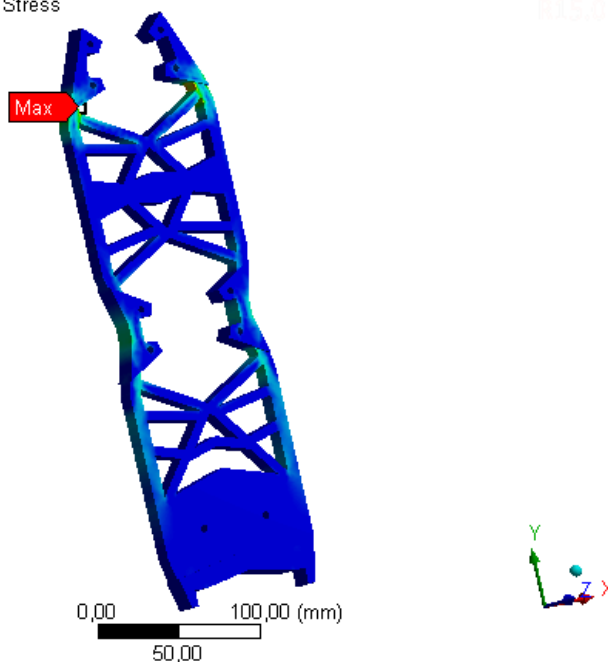
Obr. 27 Upravený model středu jeřábu - tlakové zatížení (okrajové podmínky a umístění)

Výsledky:

Maximální redukované napětí dle analýzy v součásti je 35,4 MPa. Mez pevnosti materiálu rámu středu jeřábu je 250 MPa. Výsledná bezpečnost tohoto uzlu je 7,1, což je hodnota dostatečná. Výsledek první analýzy rámu středu jeřábu je zobrazen na obrázku 28.

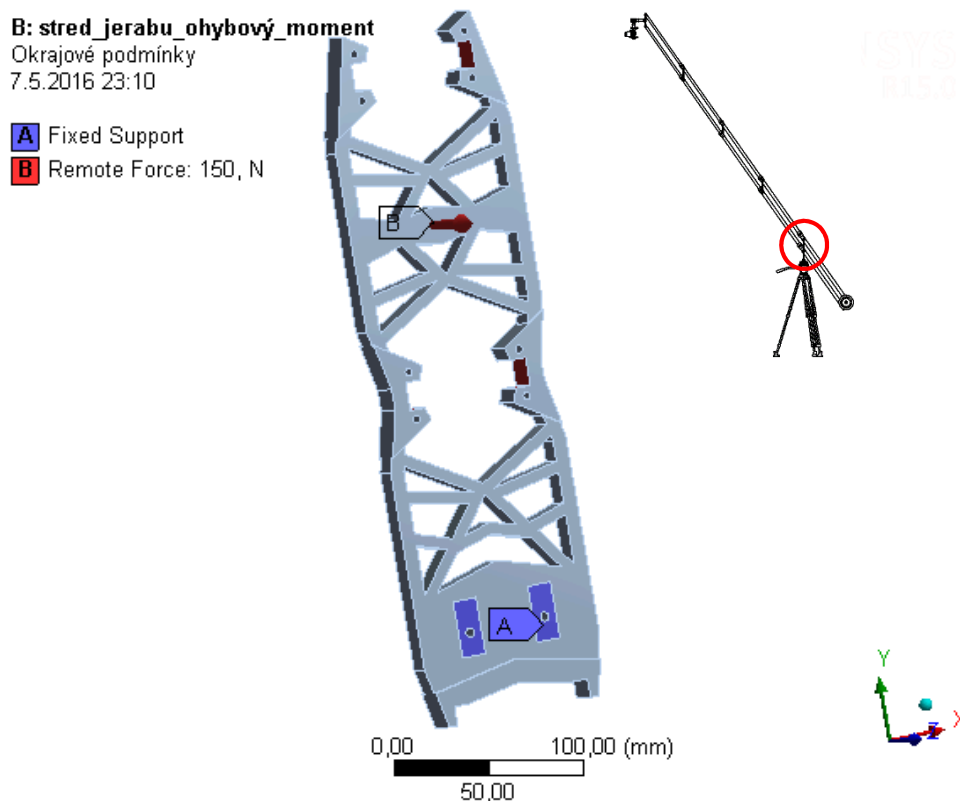
A: stred_jerabu
Redukované napětí
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
7.5.2016 23:07

35,398 Max
31,465
27,532
23,599
19,666
15,732
11,799
7,8662
3,9331
1,2233e-5 Min



Obr. 28 Střed jeřábu - tlakové zatížení- redukované napětí

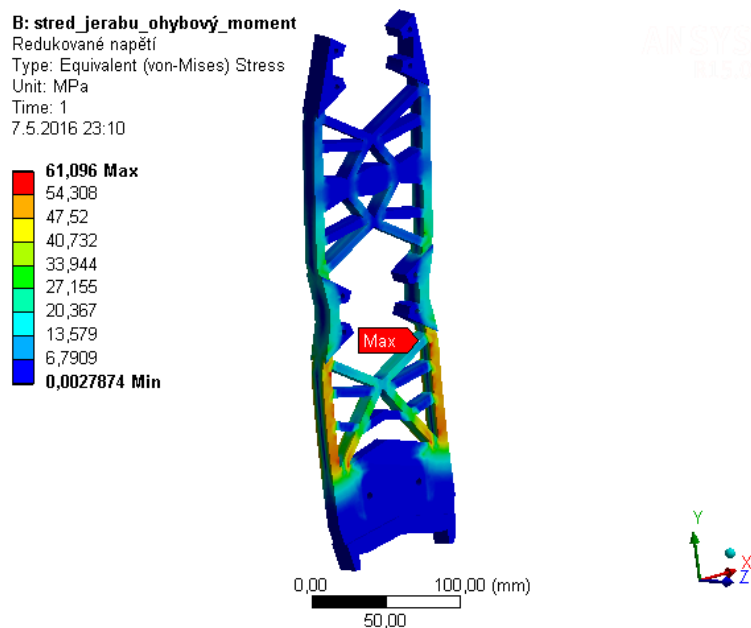
V případě druhé analýzy jsem rám středu jeřábu zatěžoval ohybovou silou. To může nastat v případě, že operátor sundá kameru z hlavy na vysunutém rameni dříve než protizávaží. Tento kritický stav byl již popsán v kapitole 3.5 (Střed jeřábu). Na obrázku 29 je zobrazen upravený model s okrajovými podmínkami. Pevnou vazbu jsem zde volil jinak než v předchozí analýze. Je aplikována na všechna místa styku žeber s rámem. Sílu jsem umístil stejně, tedy do míst, kde se nacházejí polyamidová ložiska. Velikost síly je stanovena z váhy protizávaží. V tomto případě již neuvažuji nad dynamickým účinkem, jelikož převážené rameno s protizávažím se nemůže dále pohnout (konečný stav).



Obr. 29 Upravený model střed jeřábu - ohybové zatížení (okrajové podmínky a umístění)

Výsledky:

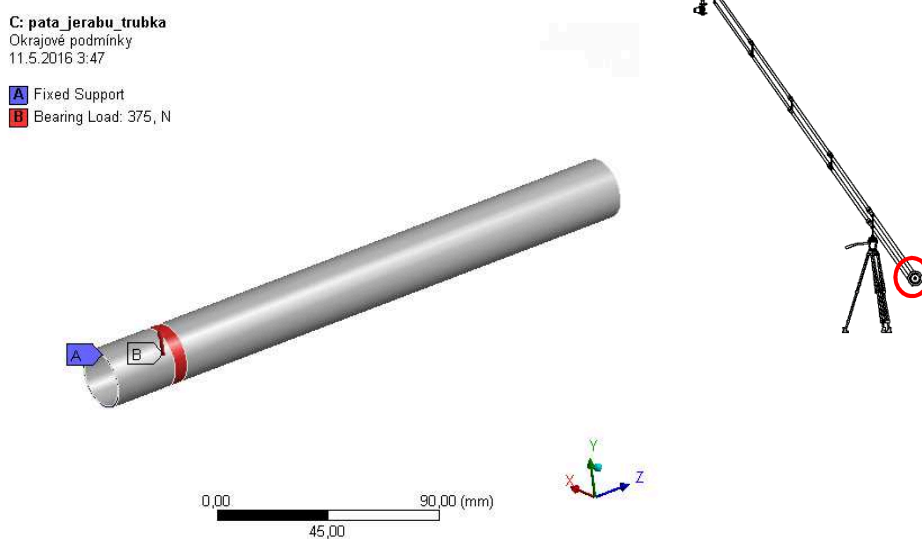
Dle analýzy maximální redukované napětí v rámu je 61,1 MPa. Průběh napětí v rámu je zobrazen na obrázku 30. Mez pevnosti materiálu rámu středu jeřábu je 250 MPa. Výsledná bezpečnost tohoto uzlu je 4,09, což je dostatečná hodnota. Rám tedy vyhovuje.



Obr. 30 Střed jeřábu - ohybové zatížení- redukované napětí

4.3 Pata jeřábu

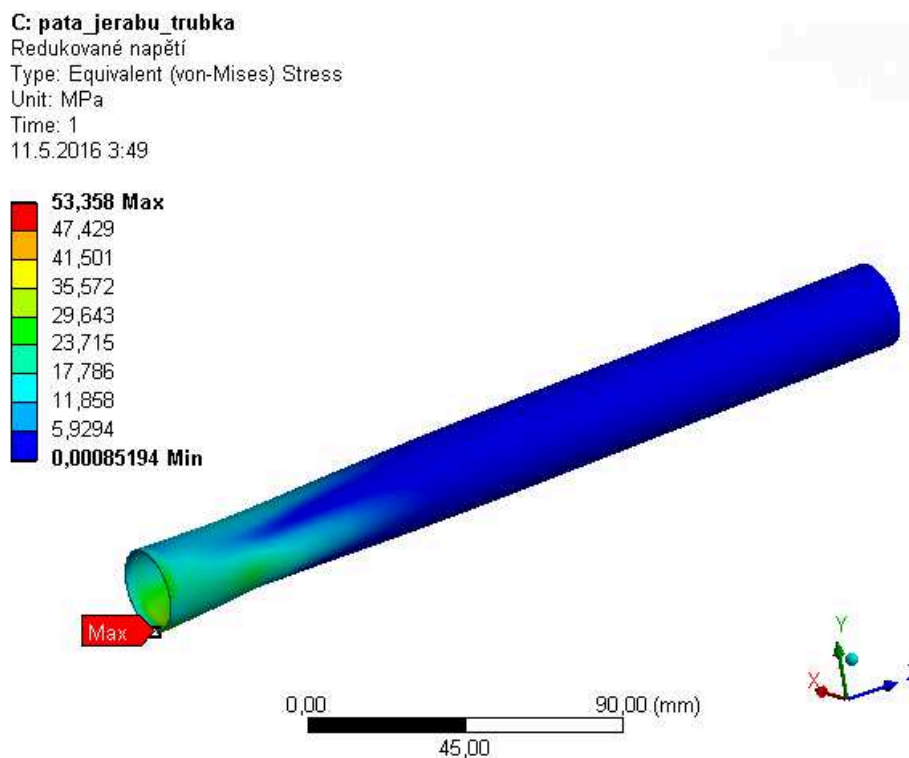
Tento konstrukční uzel jsem rozdělil na dvě samostatné analýzy, jelikož byly výpočetně jednodušší pro počítačový program, a také dostatečně vypovídající. Nejprve jsem tedy zanalyzoval trubku z uhlíkových vláken, na kterou se pokládá protizávaží. Do analýzy jsem aplikoval pouze její půlku a uvažoval jsem nad ní jako nad vetknutým nosníkem. Na obrázku 31 je uveden tento zkoumaný model s okrajovými podmínkami. Pevnou vazbu jsem zadal na pomyslný střed trubky. Síla je pak aplikována jako zatížení ložiskem v místech styku trubky s hliníkovým rámem (reakce). Velikost síly je stanovena z poloviny hmotnosti protizávaží. Zde znovu zvětšuji i její hodnotu o dynamický součinitel 5. Hodnota síly je tedy 375 N.



Obr. 31 Pata jeřábu - trubka z uhlíkových vláken (okrajové podmínky a umístění)

Výsledky:

Velikost maximálního redukovaného napětí je 53,4 MPa. Průběh napětí v trubce je zobrazen na obrázku 32. Mez pevnosti materiálu trubky je 1000 MPa. Výsledná bezpečnost tohoto uzlu je tak 18,7. Velikost prohnutí trubky je 0,09 mm. To znamená, že umístěné závaží na tuto trubku samo nesklouzne. Při prudkém zacházení (otáčení) by však mohlo spadnout a ohrozit obsluhu. Proto doporučuji pojistit závaží jednoduchými hliníkovými objímkami. Na obrázku 33 je uvedena vlastní konstrukce pojistné objímky.

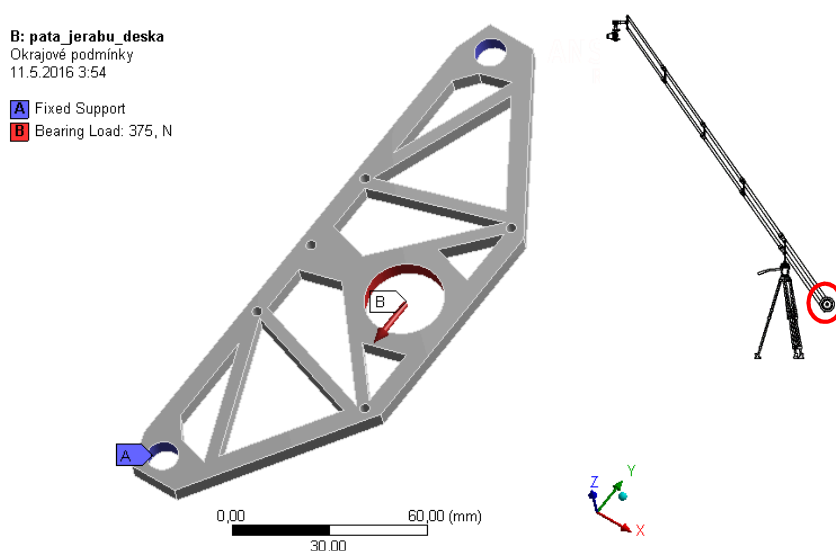


Obr. 32 Pata jeřábu - trubka z uhlíkových vláken - redukované napětí



Obr. 33 Objímka pro pojištění protizávaží na trubce

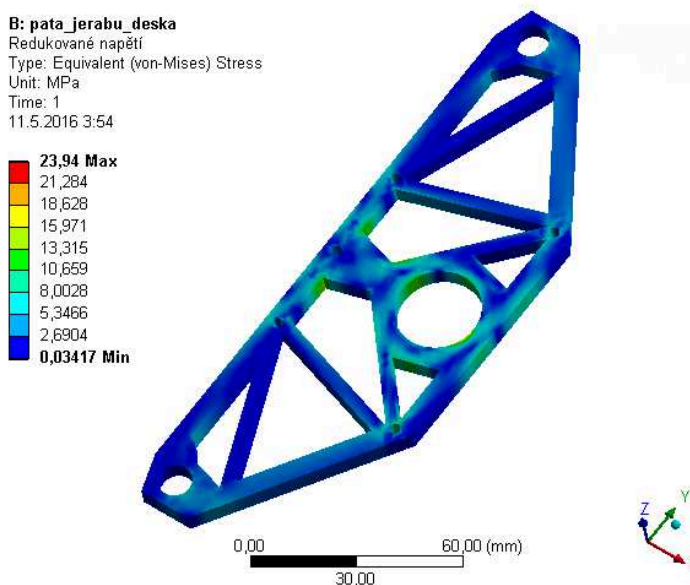
Jako druhou součást jsem zkontroloval pomocí MKP analýzy rám ze slitiny hliníku. I když se v sestavě paty jeřábu nacházejí dva rámy, zkontroloval jsem pouze jeden, jelikož je sestava symetrická. Upravený počítačový model pro jednodušší výpočet je zobrazen na obrázku 34. Pevnou vazbu jsem aplikoval do děr pro uložení polyamidových ložisek. Síla je pak aplikovaná stejně jako v předchozí analýze, tedy do otvoru pro trubku pomocí zatížení ložiskem. Její hodnotu jsem také ponechal stejnou, tedy 375 N.



Obr. 34 Pata jeřábu - hliníkový rám (okrajové podmínky a umístění)

Výsledky:

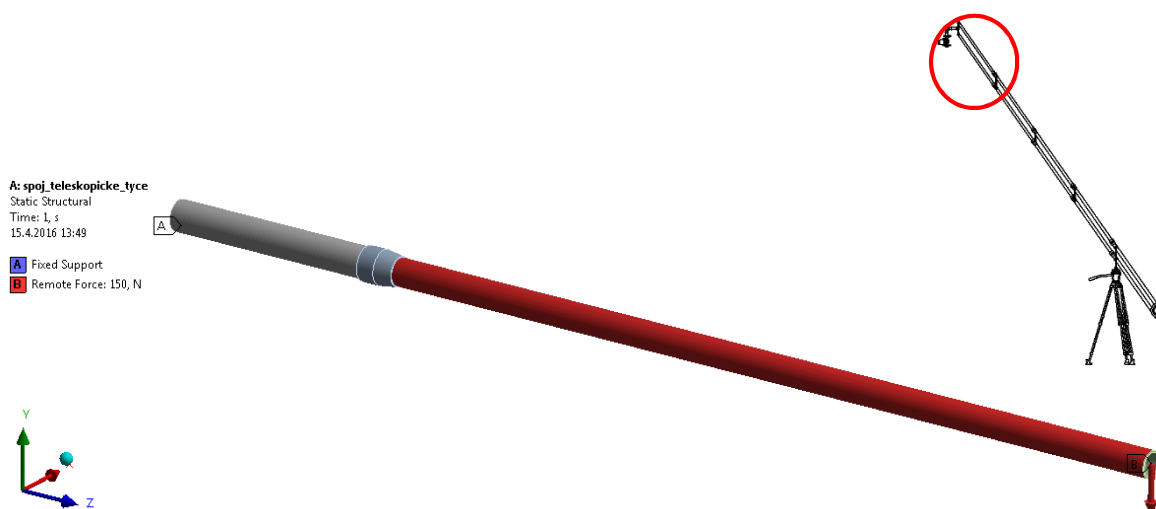
Výsledné maximální redukované napětí v této součásti má hodnotu 23,9 MPa. Mez pevnosti materiálu rámu paty jeřábu je 250 MPa. Výsledná bezpečnost tohoto uzlu je 10,5, což je hodnota dostatečná.



Obr. 35 Pata jeřábu - hliníkový rám - redukované napětí

4.4 Napětí v zámku ramene (kritické místo)

Pro aplikaci poslední počítačové analýzy metodou MKP jsem zvolil trubku s pojistným zámkem teleskopického ramene. Uhlíková vlákna mají tendenci praskat při ohybu přes ostrou hranu. Teleskopické tyče jeřábu jsou také velmi namáhané na ohyb. Proto objímka ze slitiny hliníku v pojistném zámku se mi jeví jako kritické místo, kde by mohlo dojít k prasknutí trubky. Vytvořil jsem tedy jednoduchou sestavu pro kontrolu tohoto místa. Je vyobrazena na obrázku 36. Je to vrchol jedné z teleskopických tyčí ramene jeřábu. Sestavu zkoumám opět jako vetknutý nosník. Pevné vetknutí je umístěno na konci větší trubky, jejíž délka byla zmenšena pro účel analýzy. Jednotlivé části celé sestavy nosníku byly zavazbeny k sobě dle skutečnosti. To znamená, že v místech lepeného spoje byla zvolena pevná vazba, a v místech konstantního styku byla zvolena třecí vazba. Síla působí na opačném konci na čele menší trubky. Byla stanovena z hmotnosti kamery a konce jeřábu. Je samozřejmě také zvětšena pětinásobně pro započítání dynamického účinku síly. Velikost síly je 150 N.



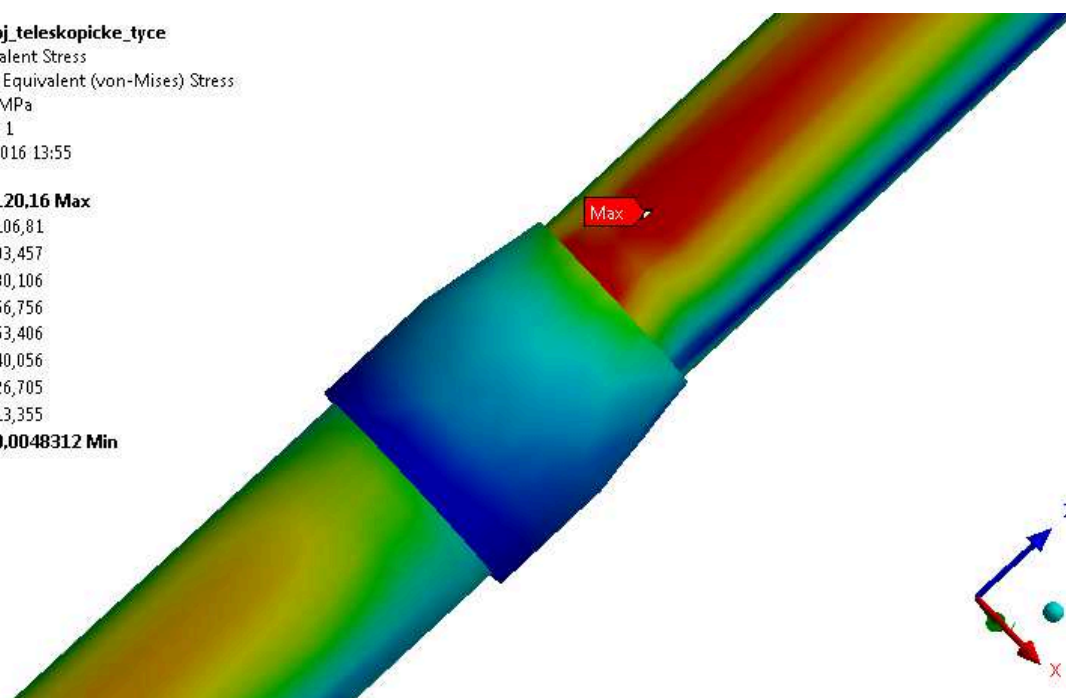
Obr. 36 Zkoumaná sestava konce teleskopického ramene (okrajové podmínky a umístění)

Výsledky:

Velikost maximální redukovaného napětí v sestavě je 120,2 MPa. Nachází se nečekaně mimo místo styku trubky s objímkou. Detail tohoto místa je zobrazen na obrázku 37. Napětí se objevilo v trubce ramene přibližně 10 mm před objímkou pojistného zámku. To je způsobeno výpočtem redukovaného napětí, které může být zavádějící. Mez pevnosti materiálu trubky ramene je 1000 MPa. Výsledná bezpečnost tohoto uzlu je 8,3, což je dostatečná hodnota. Zkoumané rameno tak pevnostně vyhovuje.

A: spoj_teslopicke_tyce
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 15.4.2016 13:55

120,16 Max
 106,81
 93,457
 80,106
 66,756
 53,406
 40,056
 26,705
 13,355
0,0048312 Min

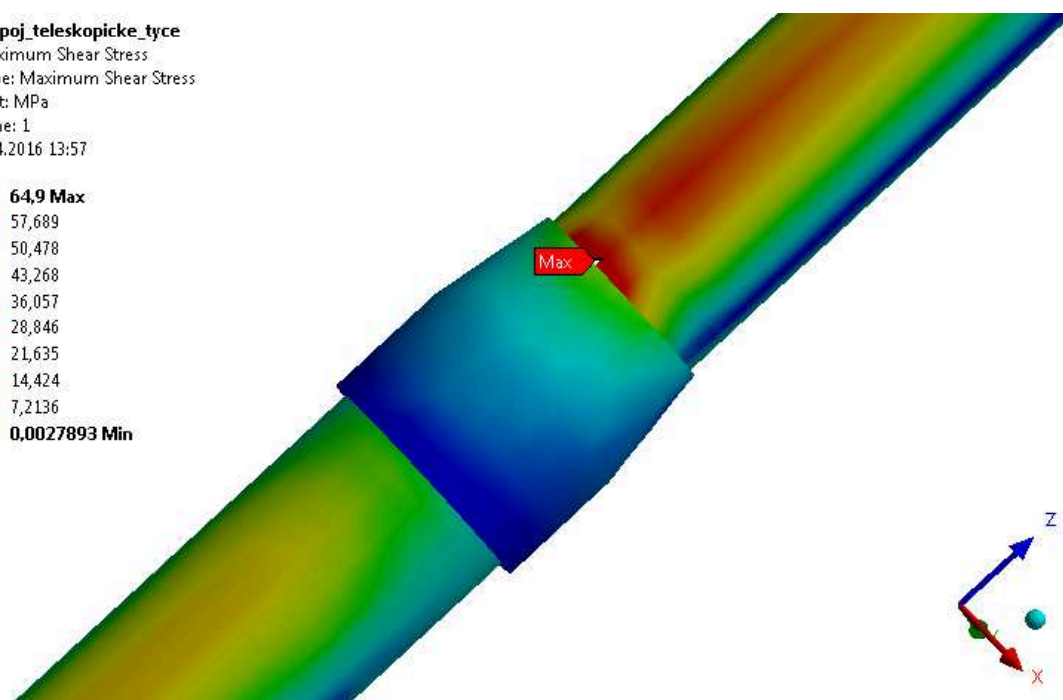


Obr. 37 Zkoumaná sestava konce teleskopického ramene - maximální redukované napětí

Rozhodl jsem se také počítačovým programem vypočítat největší smykové napětí v této zkoumané sestavě. Výsledek této analýzy je zobrazen na obrázku 38. Zde už je patrné, že největší smykové napětí se nachází v místě styku objímky s trubicí. Jeho velikost je 64,9 MPa, a je tak menší než maximální redukované napětí.

A: spoj_teslopicke_tyce
 Maximum Shear Stress
 Type: Maximum Shear Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 15.4.2016 13:57

64,9 Max
 57,689
 50,478
 43,268
 36,057
 28,846
 21,635
 14,424
 7,2136
0,0027893 Min

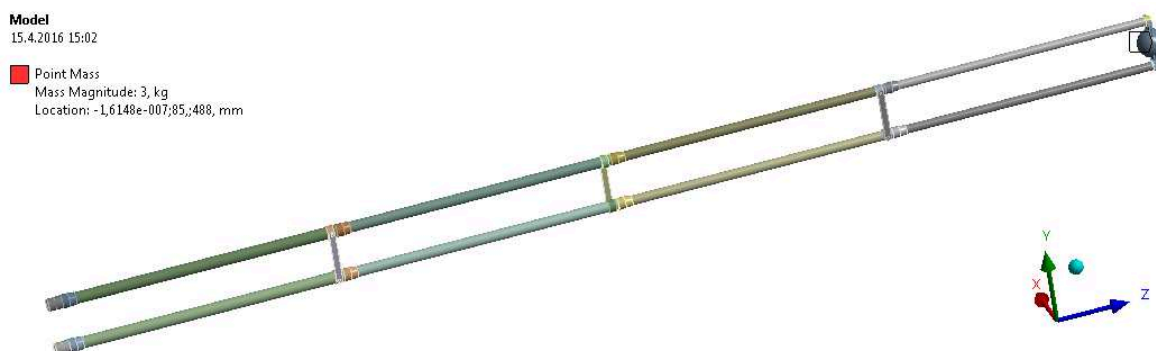


Obr. 38 Zkoumaná sestava konce teleskopického ramene - maximální smykové napětí

5 Vlastní frekvence

V této kapitole se věnuji výpočtu vlastních frekvencí vysunutého ramene jeřábu. Tato simulace nebyla nutná pro mou zprávu, avšak chtěl jsem si tak ověřit tuhost ramene. Zjišťuji velikosti jednotlivých frekvencí, při kterých dochází k harmonickému kmitání. Tuto analýzu jsem opět provedl pomocí počítačového programu ANSYS 15.0.

Nejprve jsem zhotovil v programu Autodesk Inventor upravený počítačový model, který jsem poté převedl do zmíněného výpočtového programu. Tento model (sestava) je zobrazen na obrázku 39. Snažil jsem se jej co nejvíce zjednodušit tak, aby výpočet pro program ANSYS 15.0 nebyl příliš složitý. Opět uvažuji nad ramenem, jako nad vetknutým nosníkem. Vymodeloval jsem tedy pouze delší stranu ramene, na které je přichycena hlava jeřábu s kamerou. Jednotlivé spojky teleskopických tyčí jsem nahradil jednoduchými plochými profily ze slitiny hliníku o stejné hmotnosti jako skutečné spojky. Také rám vrcholu jeřábu jsem velmi zjednodušil. Do jeho středu jsem poté umístil hmotný bod, který nahrazuje hmotnost hlavy jeřábu s kamerou. Vazby mezi jednotlivými částmi sestavy byly zvoleny stejně jako ve skutečnosti. Celý výpočtový model odpovídá realitě, i přes jeho zjednodušení.



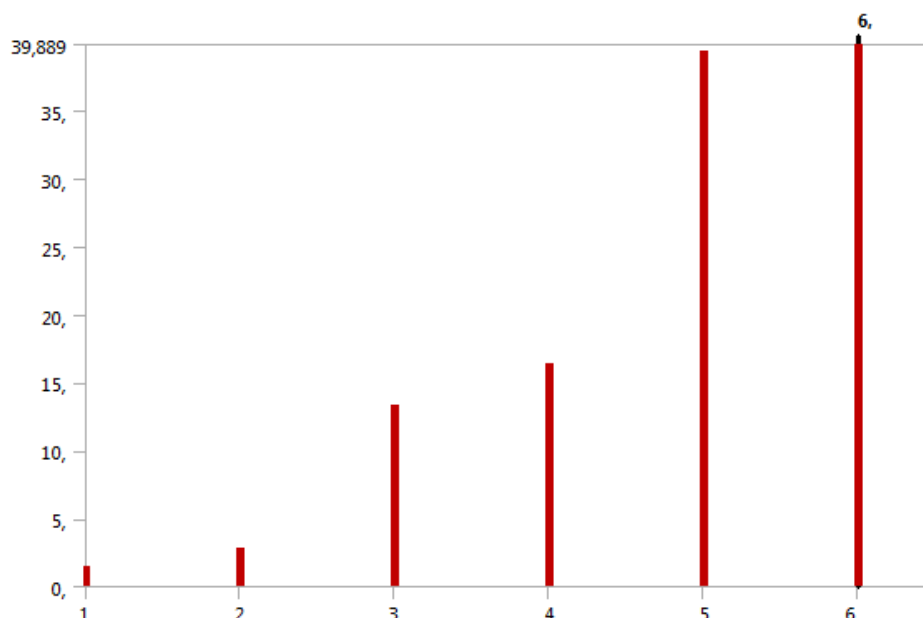
Obr. 39 Upravený výpočetní model - vlastní frekvence - okrajové podmínky

Výsledky:

Přesto, že model je značně jednoduchý, výpočet analýzy byl velmi zdlouhavý. Zvolil jsem výpočet šesti frekvencí. Výsledky simulace jsou uvedeny v tabulce 4 a vyneseny do grafu na obrázku 40.

Tab. 4 Výsledky analýzy vlastních frekvencí

Režim	Frekvence [Hz]
1	1,4998
2	2,7723
3	13,278
4	16,445
5	39,412
6	39,889



Obr. 40 Graf s výsledky analýzy vlastních frekvencí

Dle těchto výsledků nejnižší frekvence způsobující první a druhé harmonické kmitání mají velikost 1,5 Hz a 2,77 Hz. Pohybujeme se tedy v pásmu infrazvuku. Uvažují-li nad tím, že mé zařízení se bude používat převážně v přírodě (otevřený prostor), zde takovéto frekvence může vyvolat vítr. Na obrázku 41 je zobrazena deformace vysunutého ramene při frekvenci 1,5 Hz. Velikost maximální deformace v tomto případě je přibližně 507,5 mm a je orientovaná do kladného směru osy x.

B: Modal_vl_frekvence_jerab

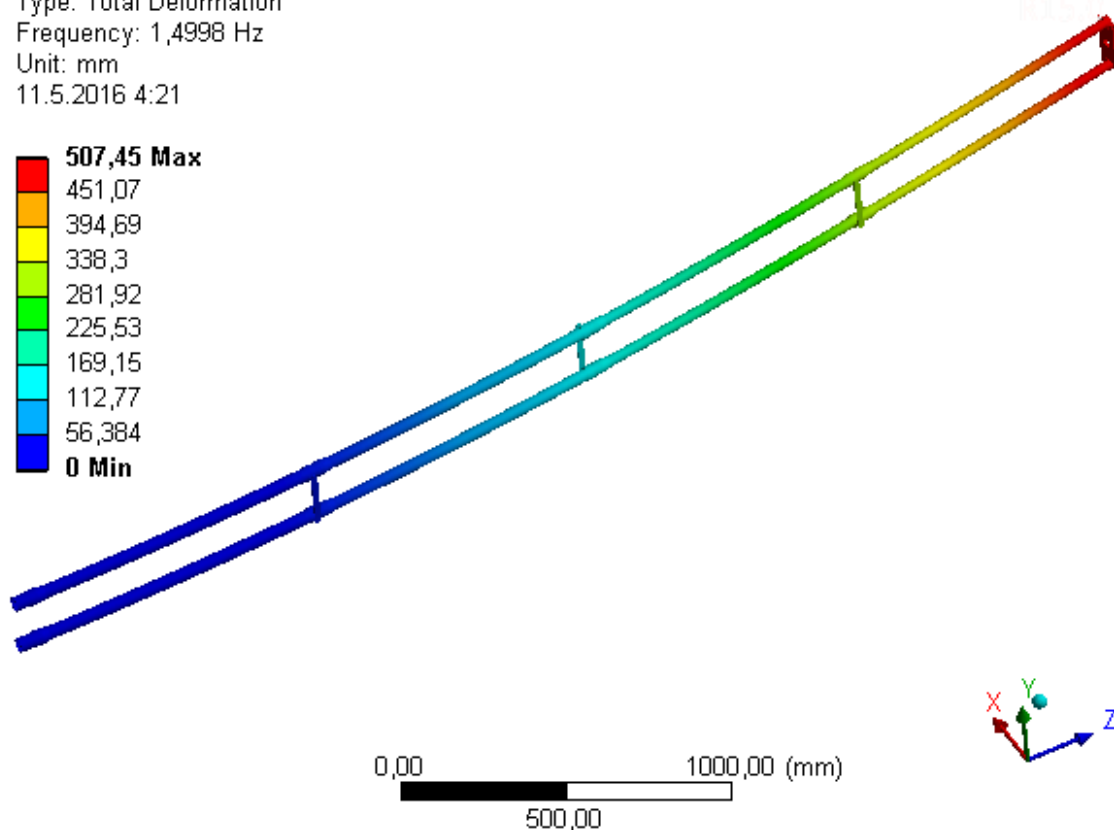
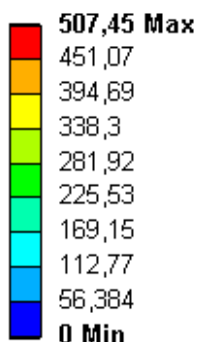
Nejmenší frekvence

Type: Total Deformation

Frequency: 1,4998 Hz

Unit: mm

11.5.2016 4:21



Obr. 41 Výsledek analýzy vlastních frekvencí - největší deformace při nejnižší frekvenci

Dále také stojí za zmínku největší zjištěné vlastní frekvence mé konstrukce. Mají velikost 39,9 Hz. Zde se pohybujeme v pásmu nízkofrekvenčního hluku. Tyto frekvence způsobují v rameni vyšší harmonické kmitání. Na obrázku 42 je zobrazena deformace ramene při těchto frekvencích. Je zajímavé vidět, že v tomto případě se již kamera uchycená na konci ramene zcela nehýbe a kmitá pouze rameno. Největší deformace má velikost 833,9 mm a je také orientovaná v ose x.

B: Modal_vl_frekvence_jerab

Největší frekvence

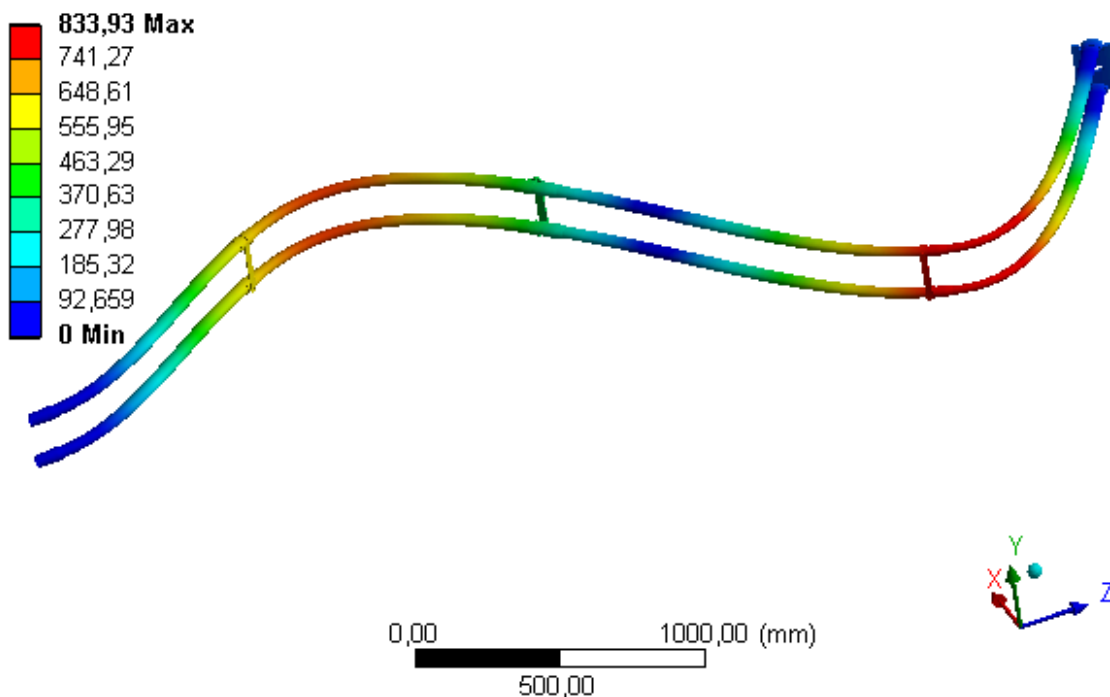
Type: Total Deformation

Frequency: 39,889 Hz

Unit: mm

11.5.2016 4:19

ANSYS
R15.0



Obr. 42 Výsledek analýzy vlastních frekvencí - největší deformace při nejvyšší frekvenci

Z výsledků této analýzy lze vyvodit závěr, že rameno jeřábu není dostatečně tuhé z bočních stran. Jak vidíte na předchozích obrázcích 41 a 42, největší deformace jsou v ose x. To je také velká nevýhoda dvoutyčového typu ramene jeřábu. Pokud bychom požadovali větší tuhost ramene, je tedy nutné zvolit třítyčovou variantu. Ta nabízí větší tuhost konstrukce. Na druhou stranu je však těžká a neskladná. Proto dle mého názoru dvoutyčové rameno je dostačující. Nesmíme jej však provozovat při vyšších povětrnostních podmínkách, při kterých ani nemůžeme pořídit kvalitní kamerové záběry.

6 Závěr

V této diplomové práci se zabývám konstrukčním návrhem multifunkčního kamerového jeřábu, který je určen především pro natáčení statických a dynamických záběrů ve volné přírodě. Celá konstrukce je navržena dle odborné literatury.

Na úvod práce jsem vysvětlil, co je to kamerový jeřáb, a k čemu takovéto zařízení slouží. Zpracoval jsem také podrobnou rešerši v této oblasti.

Dle získaných informací a zadaných parametrů jsem navrhnul vlastní konstrukci kamerového jeřábu s multifunkční hlavou. Dbal jsem na lehkost, skladnost a tuhost konstrukce. Navržená konstrukce je z uhlíkových vláken a slitiny hliníku. Celková hmotnost kamerového jeřábu bez protizávaží, stativu a kamery je 8,7 kg. Zkonstruované dvoutyčové teleskopické rameno má největší délku 5,3 metry (rozložený stav) a nejnižší 1,7 metru (složený stav). Po odejmutí hlavy jeřábu je pak rameno dlouhé 1,5 metru. Celou konstrukci jsem konstruoval pro pětinasobné přetížení tak, aby vydržela například ve vysokém větru, nebo při nevhodné zacházení obsluhou jeřábu. Zvolil jsem také vhodný typ stativu a protizávaží. Motorizovaná hlava jeřábu funguje jako gimbal (automatický stabilizátor kamery).

Následně jsem u jednotlivých konstrukčních uzlů jeřábu provedl nezbytné pevnostní výpočty nosných částí. Všechny tyto kontrolované části vyhovují s dostatečnou bezpečností.

Jelikož vlastní návrh jeřábu obsahuje mnoho tvarově složitých rámů ze slitiny hliníku, provedl jsem počítačové analýzy MKP v programu ANSYS 15.0. Výsledky napětí všech analýz jednotlivých rámů se pohybují v mezi bezpečnosti. Zkontroloval jsem také kritické místo v teleskopické tyči ramene jeřábu. Konkrétně se jedná o styk trubky z uhlíkových vláken a objímky pojistného zámku ze slitiny hliníku. Při zatížení ramene by tedy zde mohlo dojít k prasknutí trubky, jelikož se trubka ohýbá přes ostrou hranu. Výsledné napětí v této analýze i v tomto případě je v mezi bezpečnosti a nedojde tak k prasknutí trubky.

V programu ANSYS 15.0 jsem také zkontroloval tuhost dvoutyčového ramene jeřábu výpočtem jeho vlastních frekvencí. Dle výsledku jsem zjistil, že rameno jeřábu začíná harmonicky kmitat při frekvencích 1,5 Hz a 2,77 Hz. Takovéto frekvence může způsobit například silný vítr. To znamená, že navržené rameno není v takovýchto podmínkách dostatečně tuhé. Není ho tedy vhodné za těchto podmínek používat. Jako lepší varianta s vyšší tuhostí se jeví třítyčové rameno. To je však oproti dvoutyčovému rameni těžší, méně skladné a konstrukčně složitější.

Ke konečnému návrhu kamerového jeřábu byla vytvořena výkresová dokumentace v rozsahu výkresu sestavení celé konstrukce, tří podsestav a tří dílenských výkresů.

7 Seznam použité literatury

- [1] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 2. dopl. vyd. Úvaly: ALBRA, 2005, 907 s. ISBN 80-736-1011-6.
- [2] KŘÍŽ, Rudolf. *Tabulky materiálů a předvýrobků pro strojírenství*. Ostrava: Montanex, 2000. Technické příručky (Montanex). ISBN 80-7225-017-5.
- [3] BAREŠ, Richard A. *Kompozitní materiály*. První vydání. Praha: SNTL, 1988.
- [4] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [5] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [6] DEJL, Zdeněk. *Konstrukce strojů a zařízení I: spojovací části strojů: návrh, výpočet, konstrukce*. Ostrava: Montanex, 2000. ISBN 80-7225-018-3.
- [7] BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. *Části strojů*. 5., přeprac. vyd. (v SNTL 1. vyd.). Praha: SNTL, 1989. Česká matice techn. ISBN 80-03-00046-7.
- [8] ŠVERCL, Josef. *Technické kreslení a deskriptivní geometrie: pro školu a praxi*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2008, 341 s. ISBN 80-718-3297-9.
- [9] *Vinten: Camera Support Systems 2013/2014* [online]. 2013. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.vinten.com/en/system/files/file/downloads/2013/camera-support-brochure-13-14.pdf>
- [10] 100 mm Bowl Pozi-Loc Tripods. *Vinten* [online]. 2016 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.vinten.com/en/product/100-mm-bowl-pozi-loc-tripods>
- [11] Vision 10AS Pan and Tilt Head. *Vinten* [online]. 2016 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.vinten.com/en/product/vision-10as-pan-and-tilt-head>
- [12] Power Plus SPJ-1046VR-MKII Virtual Camera Tracking Crane (6 metre). *Digital Precision Systems Ltd.* [online]. Hong Kong, 2010 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.dpshk.com/products/list/power-plus-virtual-series/power-plus-spj-1046vr-mkii-virtual-camera-tracking-crane-6-m>
- [13] *DSLR-DEVICES.COM* [online]. London, 2012 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.dslr-devices.com/crane-mk4/>
- [14] CAMTREE Flylite 18Ft Camera Crane With Jib Stand. *ThaiDVshop* [online]. Bangramard [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.thaidvshop.com/index.php/products/jib-cranes/camtree-flylite-18ft-camera-crane-with-jib-stand-detail>
- [15] SUPERTECHNO 100. *PANAVISION* [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://uk.panavision.com/supert techno-100>

- [16] The ProAm Orion is a Sturdy, Smart & Affordable DSLR Crane. *Fstoppers* [online]. 2014 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <https://fstoppers.com/gear/proam-orion-sturdy-smart-affordable-dslr-crane-7931>
- [17] SnapCrane w/ CPJR-K5 remote head. *VariZoom* [online]. Austin, 2014 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.varizoom.com/product-p/vzsnapcrane16-cpjr.htm>
- [18] COCHES CÁMARA, PERSIGUIENDO SUEÑOS. *8000vueltas.com* [online]. 2014 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://8000vueltas.com/2014/02/20/coches-camara-persiguiendo-suenos>
- [19] 3 Axis Gimbal 32-Bit (Carbon Fiber). *SUPAMODS* [online]. 2016 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://supamods.com/product/3-axis-gimbal/3-axis-gimbal-32-bit-carbon-fiber/>
- [20] Sada závaží. *E-sportshop.cz* [online]. 2013 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.e-sportshop.cz/cz/sada-zavazi-30kg-pro-posilovaci-lavici-pl.html>
- [21] Vinten 3881-3 Pozi-Loc Tripod. *CVP Group* [online]. 2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://cvp.com/index.php?t=product/vinten_3881-3
- [22] Vinten V4092-0001 Vision Blue Head. *Full Compass Systems* [online]. 2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.fullcompass.com/prod/193621-Vinten-V4092-0001>
- [23] Duralová trubka O 28mm/1mm. *Firelovers* [online]. Praha, 2015 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: http://firelovers.com/index.php?id_product=201584&controller=product&id_lang=6&search_query=dural&results=46
- [24] Carbon fiber roll wrap tube - 28mm x 26mm x 1000mm. *Carbon Fiber Australia* [online]. 2014 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.carbonfiber.com.au/prod93.htm>

8 Seznam příloh

Sestavný výkres multifunkčního kamerového jeřábu:	PET0086-S01
Sestavný výkres teleskopického ramene:	PET0086-S01-S08
Sestavný výkres vrcholu jeřábu:	PET0086-S01-S02
Sestavný výkres středu jeřábu:	PET0086-S01-S06
Dílenský výkres objímky pojistného zámku 1:	PET0086-S01-S08-S01-01
Dílenský výkres šroubu pojistného zámku 1:	PET0086-S01-S08-S01-02
Dílenský výkres matice zámku 1:	PET0086-S01-S08-S01-03

Celá diplomová práce včetně výkresové dokumentace v zadaném rozsahu v elektronické podobě je také na přiloženém CD disku.

Poděkování

Děkuji panu doc. Ing. Zdeňku Foltovi, Ph.D. a paní Ing. Mileně Hrudíčkové, Ph.D. za odborné rady, které mi poskytli při vypracování mé diplomové práce.